

近畿大学工学部建築学科卒業研究概要

平成15年度		番号	99168111
指導教官	藤井 大地 助教授	氏名	藤田 雄大
題名	高層建築の構造システムに関する研究		

1. はじめに

近年、行政改革により市町村合併が各地で行われている。それにより、現在の市庁舎では行政業務がすべて収まりきらず、スペース拡大のため新庁舎の新築を決めるところも出てきている。新庁舎の新築のための場所も現在の市庁舎が存在する所が多いので高層建築になる所も出てくる。新庁舎を高層建築にするには、都市にとってのシンボル性を備えており、さらに、次世代のために環境を配慮した太陽光発電や都市緑化のようなエコシステムでの省力・省エネルギー対策、また、ヘリポートや大火災の時のための防災設備を備えていなければならない。それにはコストの削減が必須になってくる。

そこで本研究では、新庁舎の建設基本構想案の作成にかかわる中で、高層ビルの平面計画、断面計画、エコシステムなどの環境を配慮した設備計画に注目し、平面計画、断面計画については、その良否を判断するプログラムを開発し、設備計画については、既存庁舎に関する調査を行なった。特に、平面計画の構造的良否を判断する手法として、薄肉はり断面のせん断応力分布を求めるせん断流解析理論にもとづくプログラムを開発した。また、断面計画の構造的良否を判断する手法として、平面骨組の最適設計プログラムを開発した。

2. 高層建築の構造システム¹⁾

高層建築の荷重をささえる構造システムにはさまざまな物がある。

2.1 コア+外周壁構造システム

鉛直の面要素を外周壁に採用し、コアの周囲に自由な内部空間を形成するように配置した構造システムである。内部空間の大きさは、上階の床の構造形式によって決まる。コアは、内部に設備機器と上下方向の交通システムを収納し、かつ建物の剛性を高める働きをする。

2.2 ラーメン構造システム

骨組要素を組み立てて、鉛直面、水平面を形成し、その接合部を剛接とする構造システムである。鉛直面は、柱材、はり材によってグリッド状フレームとなる。同様に、大はり、小はりによって水平面にグリッドが構成される。立体骨組の健全性は、個々の柱、はり材の強度と剛性および階高や柱間隔によって決まり、いずれも建物レイアウトの設計に重要な要因となる。

2.3 チューブ・イン・チューブ構造システム

外柱と外ばりを細かく設置することにより、外周面は窓開口付壁の外観となり、建築全体が地上に建つ中空チューブ片持ばりの働きをする構造システムである。内部コア(チューブ)は、外周チューブとともに荷重を受け持ち、建物の剛性を増す働きをする。

3. 既存庁舎の構造システム



3.1 糸満市新庁舎²⁾

人・環境にやさしい庁舎

糸満市は、地球環境の温暖化防止に対し、今後計画される公共施設に新エネルギーの導入を図り、市民の喚起を促し快適な地球環境を創っていくという「糸満市新エネルギービジョン」を平成8年に策定した。その取組みとして平成14年春に竣工した新しい市庁舎には、地方自治体では最大級の195.6kWの太陽光発電システムを設置している。

付加機能を備えた太陽光発電システム

庁舎の屋上と南面に設置された太陽光発電システムは、それ自体が沖縄の強い日差しを和らげ、快適な空間を生み出す日除けルーバーとして役割を持っている。

敷地面積 20,234.50 m² 建築面積 6,143.20 m²
延床面積 15,453.71 m² 階数 地上5階建+搭屋(建築基準法地上6階) 構造 鉄筋コンクリート造 一部PC工法



3.2 小倉北区役所庁舎³⁾

快適な都市環境に努めた庁舎

老朽化の進んでいた室町の旧庁舎から、平成11年、大手町に移転した。地下2階、地上8階建てで、延べ床面積は約1万8400 m²。廊下や階段に手すりを付けたほか、授乳室も設けている。1階窓口は、2階まで吹き抜けになっており、ゆったりとした空間になっている。

延床面積：18,419 m²

構造：鉄骨鉄筋コンクリート造/地下2階、地上8階

4. エコシステムに関する検討

4.1 太陽光発電と風力発電

省力・省エネルギー対策を行うにあたっては、複数の装置を併用する方法が効率がよい。理由としては、「見栄えの問題」「スペースの確保」「各発電システムの特徴による電力確保」等があげられる。しかし、個々の発電機には十分な発電

力がないため電力を補いながら数十年の先を見越して、モニタリング的に設置するのがよいと考えられる。

太陽光発電システム

太陽光発電はコストが高いのに対して、補助電力としては約 1 割～2 割程度しか補えないためコストの元を取るためには時間がかかり、エコロジーを全面的に出すために設置するほうがよいと考えられる。しかし、条件がよければ 4～5 割程度の電力を補えるのは利点だと考えられる。

風力発電システム

日本では風況のよい場所が非常に限られており、それ以外の場所では事業として利益を生み出すことは困難な状態といえる。また、風車は大きくなるほど騒音が問題となるため、一般のビルには、小型風車しか適用できず、電力をあまり取れない。利益を生み出さないまでも施設の単独電源として、自然エネルギー利用という明るいイメージの創出あるいは後世への思いやりとして実効性のある単独電源やシンボル、モニュメントとしての利用には十分な効果が期待できる。

4.2 屋上緑化・都市緑化

屋上緑化のメリットは「断熱効果における冷暖房費のカット」「雨水の流出緩和」「空気清浄」「憩いの場としての活用」がある。都市緑化については 3 つのメリットがあり、「ヒートアイランド現象の緩和」「二酸化炭素の吸収源」「地球温暖化現象の防止策」があり、自然環境と共生する庁舎としては最大限にアピールできると思われる。

4.3 設置場所について

太陽パネルは上面設置しなければ効率が悪いので、新庁舎又は旧庁舎に設置するのがよいと考える。風力発電の風車は比較的風の強い場所に設置すれば効率がよい。屋上緑化は断熱効果があるので新庁舎に設置するのがよいと考えられる。

4.4 省庁・省エネルギー対策による効果

すぐに実用的になるのは難しいが、それぞれの特徴を生かして併用しては徐々に効果が生まれるだろう。また、エコロジー庁舎としては十分な効果が期待できる。

5. 平面構造システムの力学的特性⁴⁾

5.1 せん断流解析理論

はり理論においては、曲げ応力および曲げねじり応力に釣りあうべきせん断応力を、変位解から直接計算することができない。そのため、材料力学では、材軸方向の応力の釣りあい方程式を用いて、曲げ応力や曲げねじり応力を積分することにより、このせん断応力を求める手法がとられている。このせん断応力計算法は、半逆法 (semi-inverse method) と呼ばれ、薄肉断面はりの場合のこの計算理論は、せん断流理論 (shear flow-theory) と呼ばれている。建物の水平変形は、フレームの片持ち梁作用による全体曲げによる変形と柱、はり各部材の曲げによる変形が合わさって建物の全変形となる。この内の柱、はり各部材の曲げによる変形が全変形の 80% をしめており、これがせん断応力である。図 - 1 は横せん断応力を受けたときのせん断応力の影響を表している。このように、各平面にせん断応力の影響が現れる。この 3 次元せん断変形を 2 次元せん断変形に変換してせん断流解析ソフトを作成する。



図 - 1 せん断応力の影響

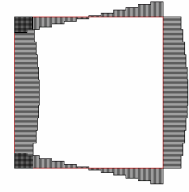


図 - 2 2次元化したせん断応力

はり理論によれば、 x, y 方向のせん断力 \bar{V}_x, \bar{V}_y および付加ねじりモーメント \bar{M}_z^ω は、変位成分に対して次式で関係づけられる。

$$\begin{aligned}\bar{V}_x &= -EI_{xx}u_s'''' \\ \bar{V}_y &= -EI_{yy}v_s'''' \\ \bar{M}_z^\omega &= -EI_\omega^{(s)}\theta''''\end{aligned}\quad (1)$$

ここに、 I_{xx}, I_{yy} は、 y, x 軸まわりの断面 2 次モーメント、 $I_\omega^{(s)}$ は断面ゆがみモーメントである。

一方、曲げおよびねじり変形問題においては、断面に垂直な方向の外力は存在しないので、補正変位 W_s に対してなす外力の仮想仕事 δW は 0 である。したがって、仮想仕事の原理 $\delta V - \delta W = 0$ より、未知変位 W_s に関する次のような仮想仕事方程式が得られる。

$$\begin{aligned}\iint G \left(\frac{\partial W_s}{\partial x} \frac{\partial \delta W_s}{\partial x} + \frac{\partial W_s}{\partial y} \frac{\partial \delta W_s}{\partial y} \right) dx dy \\ = \iint \left(\frac{\bar{V}_x}{I_y} x + \frac{\bar{V}_y}{I_x} y - \frac{\bar{M}_z^\omega}{I_\omega^{(s)}} \omega_{ns} \right) \delta W_s dx dy\end{aligned}\quad (2)$$

未知変位 $W_s(s)$ は、(2)式と同様の定式化により、 W_s に関する次のような仮想仕事法方程式を得る。ここに、 t は薄肉断面の板厚である。

$$\begin{aligned}\int G \frac{dW_s}{ds} \frac{d\delta W_s}{ds} t ds \\ = \int \left(\frac{\bar{V}_x}{I_y} x + \frac{\bar{V}_y}{I_x} y - \frac{\bar{M}_z^\omega}{I_\omega^{(s)}} \omega_{ns} \right) t ds\end{aligned}\quad (3)$$

(3)式にもとづいて薄肉断面の場合の要素剛性方程式を導く。

図 - 5.1.4 に示すように、薄肉断面はりをいくつかの線要素に分割する。その要素内で W_s が線形に変化するものと仮定すれば、 W_s は要素両端の接点値 W_i, W_j を用いて次式のように表すことができる。 l は要素長さである。

$$W_s(s) = \left(1 - \frac{s}{l} \right) W_i + \frac{s}{l} W_j \quad (4)$$

また、要素の中心線の座標 $x(s), y(s)$ および要素内の $\omega_{ns}(s)$ も上式と同様の形に表現できる。

$$\begin{aligned}x(s) &= \left(1 - \frac{s}{l} \right) x_i + \frac{s}{l} x_j \\ y(s) &= \left(1 - \frac{s}{l} \right) y_i + \frac{s}{l} y_j \\ \omega_{ns}(s) &= \left(1 - \frac{s}{l} \right) \omega_{nsi} + \frac{s}{l} \omega_{nsj}\end{aligned}\quad (5)$$

(4)、(5)式を(3)式に代入して要素内で積分すると、次のよう

な要素剛性方程式が得られる。

$$\frac{Gt}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W_i \\ W_j \end{Bmatrix} = \frac{\bar{V}_x}{I_y} \frac{tl}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ x_j \end{Bmatrix} + \frac{\bar{V}_y}{I_x} \frac{tl}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_i \\ y_j \end{Bmatrix} - \frac{\bar{M}_z^\omega}{I_\omega^{(s)}} \frac{tl}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_{nsi} \\ \omega_{nsj} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここに、 x_i, y_i, ω_{nsi} はそれぞれ i 接点の $x(s), y(s)$ の座標値および $\omega_{ns}(s)$ の値であり、 x_j, y_j, ω_{nsj} は j 接点のそれぞれの値である。(図-4)

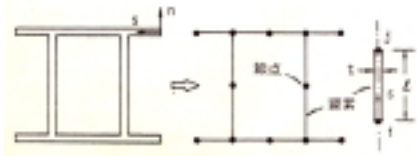


図-3 線要素へのモデル化

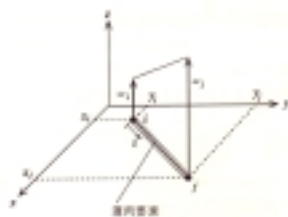


図-4 薄肉要素の節点の座標値とゆがみ値

x 方向のせん断力を受ける場合は、導いた要素剛性方程式(6)において、右辺は x の関係項のみを考慮し、 y 方向のせん断力の場合は、右辺は、 y の関係項のみを考慮することにより次の(7)式、(8)式、(9)式を得ることができる。

$$\frac{Gt}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W_i \\ W_j \end{Bmatrix} = \frac{\bar{V}_x}{I_y} \frac{tl}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ x_j \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$\frac{Gt}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W_i \\ W_j \end{Bmatrix} = \frac{\bar{V}_y}{I_x} \frac{tl}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_i \\ y_j \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\frac{Gt}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W_i \\ W_j \end{Bmatrix} = -\frac{\bar{M}_z^\omega}{I_\omega^{(s)}} \frac{tl}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_{nsi} \\ \omega_{nsj} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

(7)式、(8)式、(9)式で軸方向せん断補正変位 W_s の分布形が求められるので、各要素内のせん断応力の大きさが次のようにして計算される。

$$\tau_{sz} = G \frac{dW_s}{ds} = G \frac{W_j - W_i}{l} \quad (10)$$

の計算式が得られる、この(10)式によりせん断応力は求めることができる。

5.2 せん断流解析の概要

本解析ソフトは一般の技術者が設計に利用しやすいように Excel VBA を用いて、プログラムを作成した。内容としては、シート上に平面計画図を節点と要素に変えて計算することにより、 x 方向からの横せん断力、 y 方向からの横せん断力、付加ねじりモーメントの3つのせん断応力を解析し、図に表すプログラムである。

図-5 は始めに平面を節点と要素に分けたときの総数をそれぞれ入力するユーザフォームである。これを入力し「OK」

をクリックするとシート上に図-7の左シートのように節点番号と要素番号を入力することができる。各節点座標、各要素の両端節点番号の入力をすると図-6の「計算実行」をクリックすると解析が開始される。出力データには、図-7の右シートの τ_x, τ_y, τ_m で表す各要素のそれぞれのせん断応力が求められる。それにより、図の結果が表示することができる。

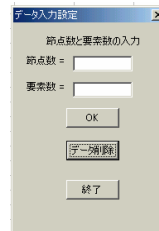


図-5 節点と要素の入力

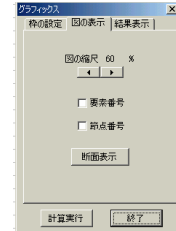


図-6 解析図の表示

入力データ	出力データ	
1 節点数= 20	54 節点座標	
2 要素数= 24	55 節点座標	
3 節点座標	56 節点座標	
4 要素座標	57 節点座標	
5 節点座標	58 節点座標	
6 要素座標	59 節点座標	
7 節点座標	60 節点座標	
8 要素座標	61 節点座標	
9 節点座標	62 節点座標	
10 要素座標	63 節点座標	
11 節点座標	64 節点座標	
12 要素座標	65 節点座標	
13 節点座標	66 節点座標	
14 要素座標	67 節点座標	
15 節点座標	68 節点座標	
16 要素座標	69 節点座標	
17 節点座標	70 節点座標	
18 要素座標	71 節点座標	
19 節点座標	72 節点座標	
20 要素座標	73 節点座標	
21 節点座標	74 節点座標	
22 要素座標	75 節点座標	
23 節点座標	76 節点座標	
24 要素座標	77 節点座標	
25 節点座標	78 節点座標	
26 要素座標	79 節点座標	
27 節点座標	80 節点座標	
28 要素座標	81 節点座標	
29 節点座標	82 節点座標	
30 要素座標	83 節点座標	
31 節点座標	84 節点座標	
32 要素座標	85 節点座標	
33 節点座標	86 節点座標	
34 要素座標	87 節点座標	
35 節点座標	88 節点座標	
36 要素座標	89 節点座標	
37 節点座標	90 節点座標	
38 要素座標	91 節点座標	
39 節点座標	92 節点座標	
40 要素座標	93 節点座標	

図-7 シート上の一例

5.3 解析結果による図の結果表示

図-6の節点番号や要素番号のチェックボックスにチェックをいれて「断面表示」をクリックすると図-8の右図ようになる。図-8は要素番号をチェックした際の表示図である。この図-8のラーメン構造を例として、以降の結果を表示する。

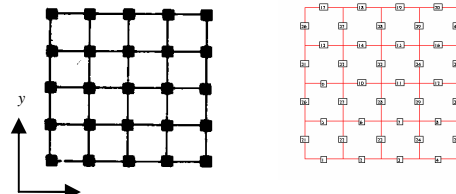


図-8 平面図と結果表示図の一例

図-8の平面図は、20×20mのラーメン構造である。

図-9はラーメン構造の x 方向からの横せん断力を受けたときのせん断応力図である。図より中心に行くほど、 x 方向の柱のせん断応力が増加している。 y 方向の柱にはほとんど、せん断応力が働いていない。

図-10は y 方向の横せん断応力を受けたときのせん断応力図である。正方形であるので、図-9と方向が違っただけでまったく一緒である。図-9同様、図-10もすべて同じせん断応力の形をしている。よって、均等に柱にせん断応力が働いており、安定しているといえる。

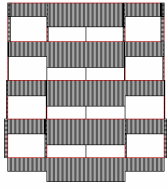


図 - 9 x 方向横せん断応力

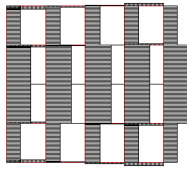


図 - 10 y 方向横せん断応力

図 - 11 は付加ねじりモーメントを受けたときのせん断応力図である。図より 4 隅に特にせん断応力が働いており、同一方向にせん断応力が働いているところが見受けられる。しかし、中央部分にはほとんどせん断応力が働いていない。つまり、重なり合っている部分の柱や外側の 4 隅の柱を補強する必要がある。

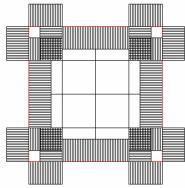


図 - 11 付加ねじりモーメントを受けたときのせん断応力図

5.4 考察

図 - 9、図 - 10 とともに、せん断応力が均等にかかっても安定している構造となっている。

図 - 11 より、3 方向からのせん断応力が多く集中している 4 隅の部材部分に剛性を高める必要がある。

6 立面骨組の部材断面最適設計プログラム⁵⁾

6.1 研究目的

建築物の構造計画においては、様々な構造計画の中から、より経済的な構造形式を選択することが重要となる。そこで、本研究では、様々な平面骨組の構造計画から、簡単にコスト比較ができるプログラムを開発する。

建物の立面骨組の情報をシート上に入力し、拘束条件、荷重条件、設計変数、下限値を入力し、応力の制約条件のもとで、骨組部材の総重量を最小化する最適設計プログラムを開発し、これをコスト比較のツールとして用いることにする。

6.3 解析結果と解析比較⁶⁾

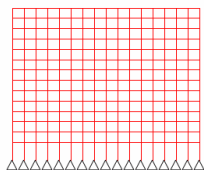


図 - 14 純ラーメン構造

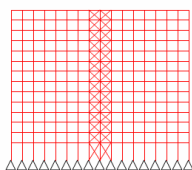


図 - 15 ラーメンブレース構造

図 - 14 の純ラーメン構造モデルは、幅 $80m$ 、高さは 1 階が $8m$ 、2 階から 14 階までは各階 $4.6m$ の計 $69.8m$ で、荷重を各階に $2.5t$ として解析をしている。図 - 15 のラーメンブレース構造モデルも同様の条件である。断面の初期値を直径 $50cm$ の丸鋼とし、柱、はりの下限値を直径 $20cm$ 、ブレースを直径 $5cm$ とした。

図 - 16 は 14 階のラーメンモデルの最終選定断面および変位図である。図の軸組は、選ばれた部材の断面積の大きさに比例した太さの線で表示した。変位図は、モデルの最大変位を表している。

図 - 16 より、ラーメンモデルは、柱が全体的に下層から

上層かけて小さくなっている。1 階の柱は $8m$ なので、最終断面が大きくなっている。

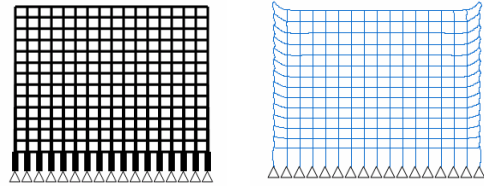


図 - 16 ラーメンモデルの最終断面と変位図

図 - 17 より、ラーメンブレースモデルでは、中央コアのモデルになっている。ラーメンモデルとは違うところは、ブレース部分の柱が大きくなっている。変位図より、ブレースの強さがわかる。

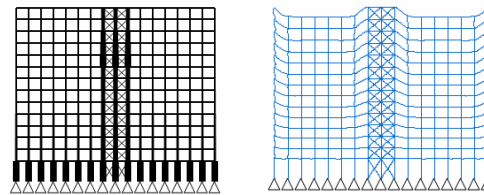


図 - 17 ラーメンブレースモデルの最終断面と変位図

図 - 18 は各モデルの総体積が step ごとに変化していくのを表し、比較したグラフである。この図を見ると各モデルとも約 11step ぐらいで収束に向かっていく。ラーメンモデルは $1.28 \times 10^8 cm^3$ 、ラーメンフレームモデルは $1.56 \times 10^8 cm^3$ という最終総体積となり、ラーメン構造のほうが低コストとなった。

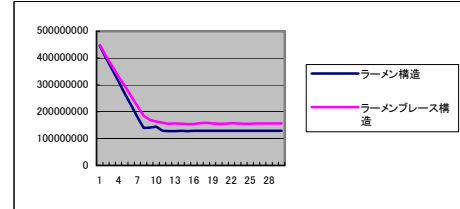


図 - 18 各モデルの総体積の変化図

7 まとめ

本研究は、エコシステムの調査によってコストの算出ができ、利用の最適な方法、効果が理解できた。高層ビルの平面計画、断面計画の構造的良否を判断するプログラムとして、高層ビル断面のせん断応力分布を求めるプログラムと、平面骨組の最適設計プログラムを開発した。前者のプログラムにより、様々な平面計画のせん断応力分布を求め、平面計画の問題点を速やかに把握できることがわかった。また、平面骨組の最適設計プログラムにより、各種の断面計画のコスト比較を行なうことが可能となり、適切な断面計画を選択する上で役立つことがわかった。

参考文献

- 1) わかりやすい高層建築の構造 鹿島出版会
- 2) 糸満市新庁舎 <http://www.city.itoman.okinawa.jp/section/kanzai/>
- 3) 小倉北区役所 <http://www.city.kitakyushu.jp/~kokura-kita/gyoumu/top.html>
- 4) 薄肉はり構造解析 藤谷義信 著 p108~p118
- 5) パソコンで解く構造デザイン 藤井大地 著 p45~p48
- 6) 鉄筋コンクリート建物の最適設計プログラムの開発 藤谷義信 著 p44~p47