

1章 建築物に働く力と構造計画

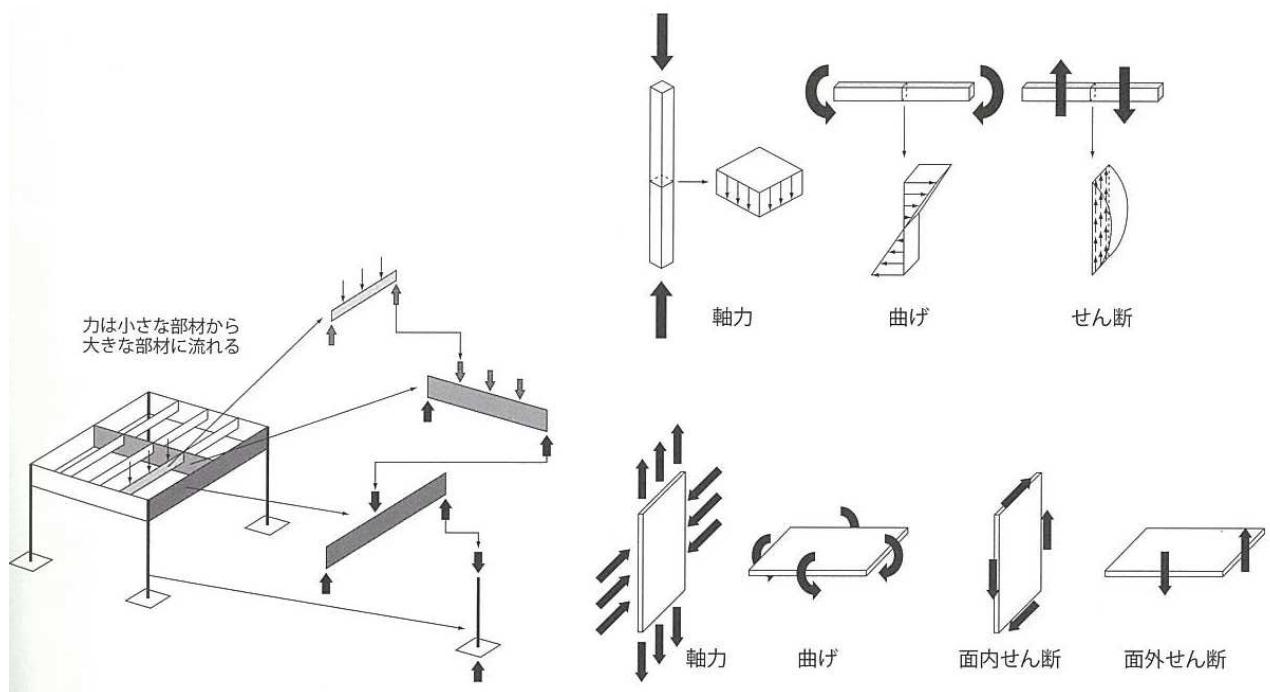
1.1 力の種類と力の流れ

建築構造物は、数十年にわたる使用期間にわたり作用する種々の力に対して安全で快適な空間を維持することが求められる。建築構造に作用した力は、柱や梁、壁、床など様々な部材に伝わり、最終的には基礎から地盤に伝えられなければならない。建築構造部材を大別すると、柱や梁のような長細い部材（一般に線材という）と、壁や床スラブのような板状の部材（一般に線材という）がある。

部材の作用する力の種類は、下図に示すように、

- ① 軸力、② 曲げモーメント、③ せん断力
- の3種類がある。

建築構造に用いられる材料としては、木材、石材、鉄鋼、コンクリートなど種々の材料があり、それぞれ、軸力（引張と圧縮がある）、曲げモーメント、せん断に対する抵抗性能が異なる。安全で快適な建築構造を実現するためには、建物に作用する力を正しく把握し、それを地盤に無理なく合理的に伝えられる架構・構造形式を採用し適切な材料を用いて構成することが必要である。



良く用いられる架構には、最も一般的なト拉斯構造、ラーメン構造の他に、平板を用いた壁式構造、曲面材を用いたアーチ・シェル・ドーム構造、ケーブルを用いた吊構造など、様々な形式がある。本講義では、最も一般的で大多数の建築構造に採用されるト拉斯構造やラーメン構造を中心に、架構に作用した力が、どの部材にそのように作用して、地盤に伝わっていくか（力の流れ）を求める方法について勉強をしていく。



富士川鉄橋（トラス）



ラーメン構造（クロスタワー大阪ベイ）



ラーメン+メガトラス（ジョンハンコックセンター）



サスペンション構造（ミネアポリス連邦準備銀行）



アーチ構造（サグラダ・ファミリア）

1.2 建築物に働く力

建築物には、建築物自体の重さだけではなく、地震や台風などによる様々な力が働く。こうした力を外力あるいは荷重といいう。

荷重および外力には、以下のようなものがある。

① 固定荷重 (Dead Load)

建築物の柱・梁・床などの部材や仕上げ材、固定されている設備機器などの建築物自体の重量（自重）のこと。鉛直方向に働く荷重。

② 積載荷重 (Live Load)

建築物内の人間や家具・調度・物品など移動できるもの（固定荷重に含まれない）の重量による荷重。

③ 積雪荷重 (Snow Load)

屋根などに降り積もった雪の重量による荷重。

④ 風荷重 (風圧力、Wind Load)

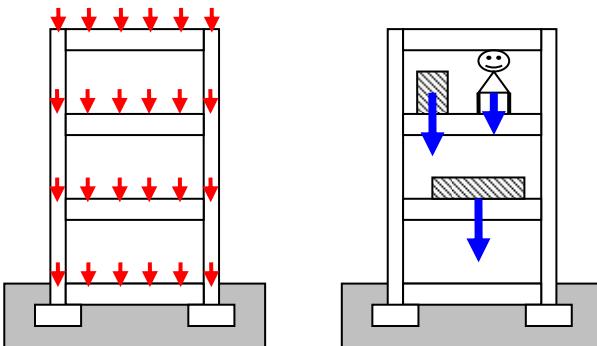
風によって建物外周の各面に働く荷重。

⑤ 地震荷重 (地震力、Seismic Load)

地震により建物が揺れるときに生じる慣性力を外力として扱い、地震力という。

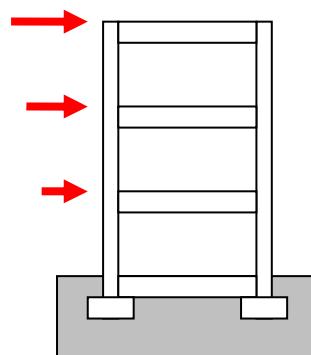
⑥ 土圧、水圧、その他

建物の地下部分の壁などに周囲の土や地下水から働く荷重を土圧・水圧という。



固定荷重

積載荷重



地震力・風圧力

1.3 構造設計に用いる荷重

構造設計では、建築基準法・施行令で上記のそれぞれ荷重の値や計算方法が示されており、それに従い荷重を求める。

① 固定荷重 (Dead Load)

固定荷重は、建築物を構成する材料の単位重量（体積あたりの重量など）と体積（面積、長さ）から実情に応じて計算する。

$$\text{部材の重量(kN)} = \text{部材の体積(m}^3\text{)} \times \text{単位体積重量(kN/m}^3\text{)}$$

表 代表的な建築材料の単位重量

| | | 単位重量 |
|-----|----------|-------------------------|
| 構造材 | コンクリート | 23 (kN/m ³) |
| | 鋼材 | 79 (kN/m ³) |
| | モルタル | 20 (kN/m ³) |
| | 鉄筋コンクリート | 24 (kN/m ³) |
| 仕上げ | OA フロア | 530 (N/m ²) |
| | シート防水 | 660 (N/m ²) |

例えば、厚さ 15cm の RC 造床スラブ + モルタル仕上げ 5cm + OA フロアの床の 1m²あたりの自重は、

$$24(\text{kN/m}^3) \times 0.15(\text{m}) + 20(\text{kN/m}^3) \times 0.05(\text{m}) + 530(\text{N/m}^2) = 5130(\text{N/m}^2)$$

質量 1(kg)のものに働く重力は 9.8(N) ≈ 10(N)なので、この床スラブ、1m²あたり約 500kg=0.5t の質量であることになる。

② 積載荷重 (Live Load)

建物内の部屋に置かれる物品や人の数量や種類は、その部屋の用途により変化する。例えば、住宅の居室なら重い家具もそれほど多くなく、何十人もの人が入ることはないが、お店の売り場には、物もたくさんあるし、人も大勢いる。

また、商業施設や学校などのように昼間は人がいるが、夜はいなくなる／図書室についていた部屋を会議室に変更したなど、建物を使っている期間中に変化する。

そこで、建築基準法では、これらの荷重についての調査・研究データを統計的に調べて、積載荷重の値を以下のように定めている

表 代表的な積載荷重

| 構造計算の対象 | 積載荷重 (N/m ²) | | |
|------------|--------------------------|----------|--------|
| | 床の設計用 | 大梁・柱の設計用 | 地震力計算用 |
| 住宅の居室など | 1,800 | 1,300 | 600 |
| 事務室 | 2,900 | 1,800 | 800 |
| 教室 | 2,300 | 2,100 | 1,100 |
| 百貨店や店舗の売り場 | 2,900 | 2,400 | 1,300 |
| 駐車場 | 5,400 | 3,900 | 2,000 |

積載荷重には、上記のように分布（ばらつき）があることを考えて、床スラブの設計には、上限に相当する値、大梁・柱の設計には、それぞれの階での平均値を、地震力の計算では、建物全体での平均的な値を使う。（めったに来ない地震と、たまたま積載荷重が最大であることは同時には起きないだろうと考えている）

③ 積雪荷重 (Snow Load)

$$\text{積雪荷重 } S(\text{N/m}^2) = \text{垂直積雪量 } d(\text{m}) \times \text{積雪の単位重量 } \rho (\text{N/m}^3)$$

垂直積雪量は、特性行政令により、過去の積雪記録に基づいて決められている。北海道や新潟会津地方などでは、3m などという場所もある。

積雪の単位重量は、2000(N/m³)である。水の単位重量は 10000(N/m³)=10(kN/m³)なので、比重が 0.2 と考えている。春などで一度融けた雪が融けきらずに再度凍ると重い雪になり、垂直積雪量が同じでも、荷重が大きくなることもある。

④ 風荷重 (風圧力、Wind Load)

風のような流体の圧力は、「流体の密度 × 速度の 2 乗」に比例する。そこで風荷重は、以下のように求める。

$$\text{風荷重(N)} = \text{受風面積(m}^2) \times \text{風圧力(N/m}^2)$$

$$\text{風圧力(N/m}^2) = \text{風圧係数} \times \text{速度圧(N/m}^2)$$

風圧係数は、建物の形状で決まる係数で、風上は正、風下では負になる。

$$\text{速度圧} (\text{N}/\text{m}^2) = 0.6 \times E \times V_0^2$$

E : 高さ方向の分布係数で、地表面の粗度を考慮してきめる係数

: 基準風速で、その地方の過去の最大風速や被害を考慮し 30~46m/s の範囲で決める。

⑤ 地震荷重 (地震力、Seismic Load)

地震時には、建物が水平方向に振動する。建物のそれぞれの階には振動するときに加速度が発生しそれにより慣性力が生じる。各階に生じる慣性力により、それぞれの層にせん断力が発生する。

建築基準法では、各階に作用するせん断力（地震層せん断力）を以下で計算することにしている。

$$Q_i = \text{地震層せん断力係数 } C_i \times \text{階の支持重量 (その階より上の重量) } W_i$$

$$C_i = \text{地域係数 } Z \times \text{振動特性係数 } R_t \times \text{層せん断力の分布係数 } A_i \times \text{標準せん断力係数 } C_0$$

1) 地域係数 Z

過去の地震記録から、地震の起りやすさ（頻度）を考えて設定した地域の地震のレベルを表す係数で、0.7~1.0の値をとる。

2) 振動特性係数 R_t

建物が受ける地震力は、建物の固有周期 T、建物を支持する地盤の種類により変化する。一般に、固有周期が 2-3 秒と長い建物には、地震の揺れが伝わらずあまり大きな地震力が発生しないが、地震で軟らかい地盤ほど長い周期でゆれるので、地震力の減り方は少なくなる。これを表すのが、振動特性係数である。

$$R_t = \begin{cases} 1 & (T \leq T_c) \\ 1 - 0.2 \left(\frac{T}{T_c} - 1 \right)^2 & (T_c \leq T \leq 2T_c) \\ \frac{1.6T_c}{T} & (2T_c \leq T) \end{cases}$$

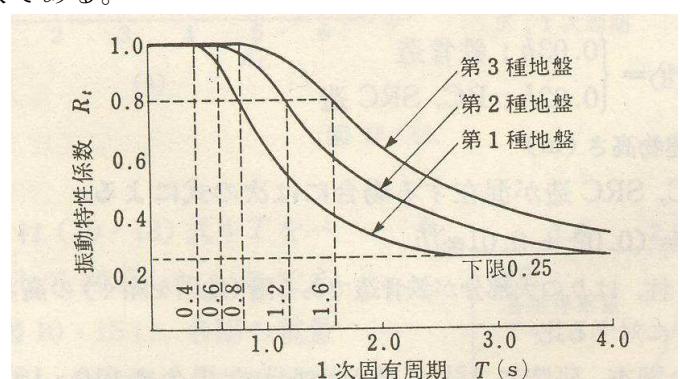
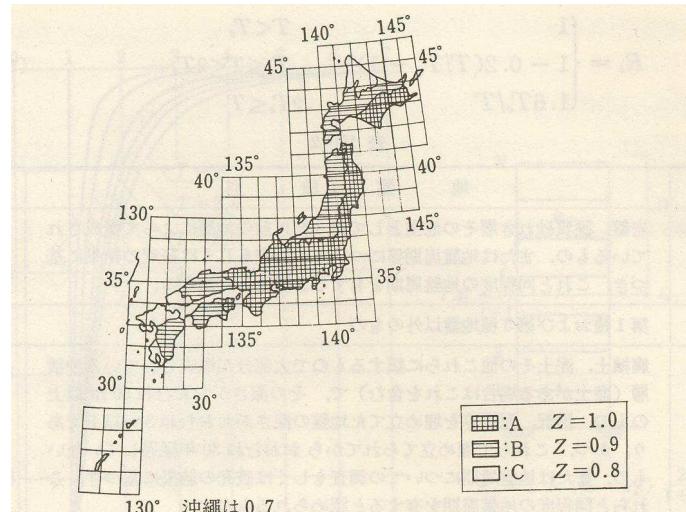
T は建物の 1 次固有周期で、以下で略算する。

$$T = \begin{cases} 0.02h & RC\text{造} \\ 0.03h & 鉄骨造、木造 \end{cases}$$

h : 建物の高さ

3) 地震層せん断力の分布係数 A_i

地震時に建物は上の階ほど大きく揺れるので、生じる加速度も上の階ほど大きくなる。層せん断力は、最上階からの慣性力の和になるので、上の階ほど重量に対する層せん断力の割合（せん断力係数）は大きくなる。これを表すのが、分布係数 A_i である。



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

α_i : 建物の全重量に対する支持重量の比

4) 標準せん断力係数 C0

建物の1階に生じる加速度の重力加速度 G (9.8m/s²) に対する比で、

1次設計（数十年に1回程度起きる中地震）では 0.2 以上

2次設計（数百年に1回起きる大地震）では 1.0 以上とする。

1.4 構造設計による建物の性能の確認と荷重の組み合わせ

建物には、前述の荷重が単独で作用するのではなく、色々な条件に応じて複数の荷重が作用する。そこで、構造設計では、以下のような荷重の状態を考えて、それぞれに対して、建物が構造物として確保すべき性能を定めて設計を行う。

① 常時作用する荷重

建物に日常的に長期間にわたり作用する荷重には、固定荷重と積載荷重がある（多雪地域では積雪荷重も）。これらの合計を長期荷重（常時荷重）という。

長期荷重に対しては、安全であることはもちろん、部材の変形やたわみ、ひび割れなどによって、建物を使用することに障害が起きないように設計を行う（使用性能の確保、機能保持）。

② まれに発生する荷重

建物の使用中に1回程度発生する荷重には、中地震や台風、大雪などがある。長期荷重と地震力、風圧力などの和を短期荷重という。

短期荷重に対しては、ある程度建物に変形やたわみが生じることはやむを得ないが（荷重は短時間で無くなるので）、部材などに大きな損傷が生じないように設計を行う（損傷防止）。

③ きわめてまれに発生する荷重

大地震など建物の使用中に発生する可能性は高くはないが無視できない荷重として、数百年に1回程度の大地震がある。

これに対しては、最低限建物の倒壊、崩壊は防止して、人命の安全性は確保することを目標に設計する（安全性能の確保）。

一般的に構造設計で考慮する荷重の組み合わせを以下に示す。

表 荷重の組み合わせ

| 荷重の種類 | 想定する状態 | 一般 | 多雪地域 |
|-------|--------|--------|--------------|
| 長期荷重 | 常時 | G+P | G+P |
| | 積雪時 | G+P | G+P+0.7S |
| 短期荷重 | 積雪時 | G+P+S | G+P+S |
| | 暴風時 | G+P+W | G+P+0.35S+W |
| | 中地震時 | G+P+K1 | G+P+0.35S+K1 |
| | 大地震時 | G+P+K2 | G+P+0.35S+K2 |

※G: 固定荷重、P: 積載荷重、S: 短期積雪荷重、W: 短期風圧力、K1: 1次設計用地震力、K2: 2次設計用地震力

1.5 構造計画の考え方と力の流れ

(1) 建物の重量

1.3で述べたように、RC造のオフィスビルは、床の自重が約5(kN/m²)、積載荷重が約1~2(kN/m²)あり、床だけで6~7(kN/m²)の重量がある。これに柱・梁・壁などの重量が加わると、トータルで平均12(kN/m²)程度の重量がある。鉄骨はコンクリートより軽くて強いので鉄骨造建物は軽くでき、8(kN/m²)程度である。(木造は数kN/m²程度)

これらの力を安全・確実に地盤へと伝えるように架構を計画する。

(2) 鉛直荷重に対する構造計画

長期荷重や、積雪荷重は、基本的に鉛直方向の荷重であり、床・屋根から梁へ伝わり、梁には曲げモーメントとせん断力が生じ、柱の軸圧縮力として、地盤に力が流れていく。梁や柱のような長細い部材(線材という)は、通常、軸力に対して強いが、曲げを受けると変形しやすく弱いので、鉛直荷重に対する設計では、梁が苦しくなることが多い。

一般的なRC構造では、梁せいはスパンの1/8~1/12程度ないと持たないので、梁せい1mとしてもスパン10m程度が限界となる。梁せいが1mもあると、居室内に梁が出っ張るなど、計画的に好ましくないので、通常はスパン8m程度以下とすることが多い。

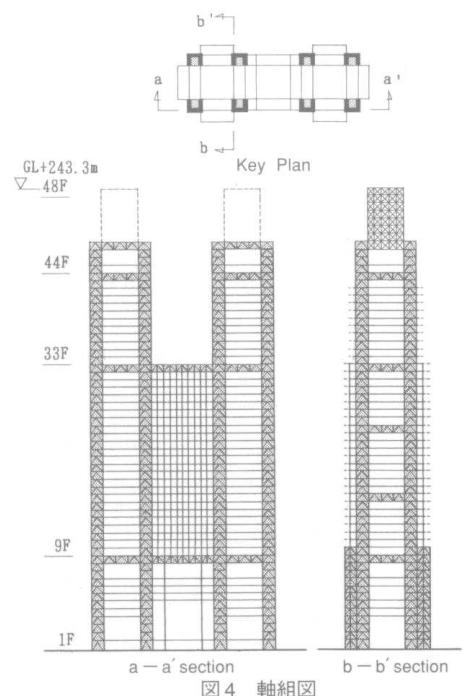
鉄骨構造は、自重が軽いのでもう少しスパンを飛ばすことが出来る。コンクリート系の構造でも、プレストレス(PC)構造といって、コンクリート断面内にケーブルを入れて締め付けることで、ひび割れが入りにくく強度・剛性の高い梁を作ることが出来、20m程度のスパンの梁をかける例もある。

もっと長い大スパンを架けるためには、トラス梁やスペースフレームなど様々な工夫がある。

東京都庁舎は、大空間のオフィススペースを確保するために、1層分の上下の梁とブレースを組み合わせたスーパーラーメン架構を採用している。ブレースと柱・梁からなる骨組が、大きな柱や梁としてラーメンを構成し(スーパーラーメン)これにより、1階の大空間や、上階の長スパンの執務空間を確保するとともに、水平力(地震力)に対する抵抗もできるようにしている。



東京都庁舎



スーパー ラーメン 架構図

ミネアポリス連邦準備銀行（1972年、J・スキリング）は、12階建で幅100mの1階に大きなピロティの空間を有する。このピロティ部の梁のスパンを飛ばすため、ケーブル（I型鋼と径22mmのケーブル8本からなる複合部材）で床をつる、吊り構造（サスペンション構造）を採用している。



ミネアポリス連邦準備銀行

パリ・デファンスの新凱旋門は、縦・横・高さ約110mの立方体の中を70mくり抜いたような形をしている。これは厚さ1.7m幅18mの口の字型のRCフレームを4枚組み合わせた架構で構成している。フレームの梁部分には、PC構造が採用されている。



テッド・デファンス（新凱旋門、パリ）

(3) 水平力（地震力など）に対する構造計画

地震力や風圧力などの水平荷重に対しては、柱や耐震壁、筋交い（ブレース）などで抵抗する。下層には最上階からの水平力の合計が作用するので、下層ほど大きなせん断力が作用する。建物1階では、中地震で建物重量の0.2倍、大地震では建物重量と同じ（1.0倍）の水平力に対して設計することになる。

鉄筋コンクリート構造では、大まかには柱の水平強度は $1(\text{N/mm}^2)$ 、壁の水平強度は $3(\text{N/mm}^2)$ 程度である。つまり、

$$1\text{m 角の柱の強度} = 1(\text{N/mm}^2) \times 1000^2 (\text{mm}^2) = 1,000,000 (\text{N}) = 1,000 (\text{kN}) \approx 100 (\text{tf})$$

厚さ200mm、長さ6mの壁の強度

$$= 3(\text{N/mm}^2) \times 200 (\text{mm}) \times 6000 (\text{mm}) = 3,600,000 (\text{N}) = 3,600 (\text{kN}) \approx 360 (\text{tf})$$

程度の水平強度がある。

これらの略算を参考にして、柱や壁の数量を決めていく。

水平力に対する構造計画で重要なのは、平面内や高さ方向で建物に作用する地震力に対してバランスよく、部材を配置し無理なく力が地盤まで流れるようにすることである。



ジョン・ハンコック・センター（シカゴ）



トランプインターナショナル・タワー（シカゴ）



ワールド・ファイナンシャルセンター（上海）



振動実験の模型試験体（同濟大学）

平面内で、水平力の作用位置（重心）と建物の強度・剛性の中心位置（剛心）がずれていると、軟らかい側の変形が大きくなり、建物に捩れ変形が発生して壊れやすくなる。

高さ方向でも、各層の強度・剛性のバランスが悪いと、軟らかく弱い層に変形が集中して、建物の崩壊が起きることがある。従って、建物内の高さ方向にもバランスの良い部材の配置を考える必要がある。

