



第7章 機械的作表法による釣合式

ポイント：釣合式を表で表す

機械的作表法による方程式の作成

前章までで、たわみ角法の基本式を用いて節点でのモーメントの釣合、及び各層における層モーメントの釣合より、整形骨組の全体釣合式を求める方法を学んだ。しかしながら、少し骨組が高層、あるいは多スパンになると全体釣合式を作成するまでに、多くの手続きが必要となり、間違いが生じ易くなる。そこで、本章では効率的に全体釣合式を作成する方法を紹介する。この方法では、整形骨組に対し、表を用いて機械的に釣合式を作成することができる。

7.1 はじめに

キーワード

整形ラーメンの釣合式 機械的作表法で釣合式を作る

たわみ角法では、整形骨組の節点番号を順序良く並べ、全体釣合式を行列表示すると、釣合式の係数行列（剛性行列）は規則正しく並んでいることが分かる。そこで、その規則性を利用して、直接この剛性行列や荷重項の中に、各部材のたわみ角法の係数や荷重を挿入することで、全体釣合式を求める方法について考える。

例として、図7-1に示す整形骨組を考える。節点番号の付け方は、上から付けても良いし、下から付けても良い。ここでは、図のように下から上に、また、左より右に順序良く付ける事にする。さらに、剛比も図のように、柱には k_{c*} として、梁は k_{b*} として記号化する。この骨組の支持条件として、節点番号1, 2, 3では、固定境界とする。

ここでは、たわみ角法の基本式として、変数変換した後の基本式を用い、再度以下に示す。

$$\left. \begin{aligned} M_{ij} &= k(2\varphi_i + \varphi_j + \psi) - C_{ij} \\ M_{ji} &= k(2\varphi_j + \varphi_i + \psi) + C_{ji} \end{aligned} \right\} \dots\dots(7.1)$$

次に、節点*i*におけるモーメントの釣合を一般形式で表すと次式となる。

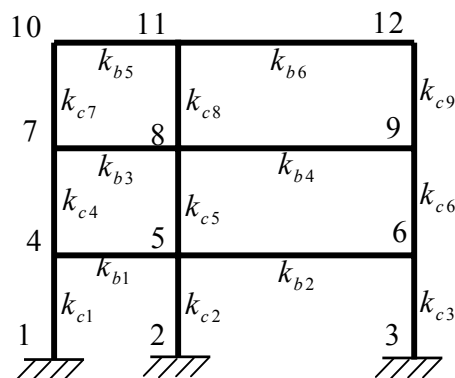


図7-1 整形骨組の節点番号と剛比の付け方

7.2 機械的作表法

$$J_i \varphi_i + \sum (k\varphi) + \sum (k\psi) = \sum C_i \quad \dots\dots(7.2)$$

上式で、第1項 J_i は、この節点 i に連結する部材剛比の総和の2倍であり、第2項は、同じく連結した部材に関する剛比と他端の節点回転角の積に対応している。また、第3項は、連結した部材の剛比と部材角の積を表す。右辺項は、節点 i に連結する部材の部材荷重で、固定端モーメントの総和を表す。その際、式(7.1)から分かるように、部材の左端が連結している場合は正の値をとり、右端の場合は負の値となる。

例えば、図7-1の骨組で鉛直荷重が梁に加わっている場合、節点4及び5の方程式は次式のようなになる。

$$\left. \begin{aligned} 2(k_{c1} + k_{c4} + k_{b1})\varphi_4 + k_{b1}\varphi_5 + k_{c4}\varphi_7 + k_{c1}\psi_1 + k_{c4}\psi_2 &= C_{45} \\ k_{b1}\varphi_4 + 2(k_{c2} + k_{c5} + k_{b1} + k_{b2})\varphi_5 + k_{b2}\varphi_6 + k_{c5}\varphi_8 \\ + k_{c2}\psi_1 + k_{c5}\psi_2 &= -(C_{54} + C_{56}) \end{aligned} \right\} \dots\dots(7.3)$$

次に、層モーメントの釣合は、式(4.39)で表されており、ここで、再度示すと以下のようなであった。

$$\sum (\bar{M}_{ij} + \bar{M}_{ji}) = \sum \bar{Q}_j h - \sum P_i h \quad \dots\dots(7.4)$$

ここで、 \bar{M}_{ij} などは、式(7.1)で示される基本式で、最後の項の固定端モーメントを除いた値であり、 \sum は当該層の柱の材端モーメントについて和を採ることを意味する。また、 h はその層の階高であり、 \bar{Q}_i は柱の両端固定時のせん断力である。式(7.1)の荷重項を除いた式を式(7.4)に代入すると、次式のような一般形が得られる。

$$\sum (3k\varphi) + \sum (2k)\psi_i = \sum \bar{Q}_j h - \sum P_i h \quad \dots\dots(7.5)$$

さらに、上式の両辺を1/3倍すると、層モーメントの釣合式の一般形が得られる。

$$\sum (k\varphi) + \frac{2}{3} \sum (k\psi_i) = \frac{1}{3} (\sum \bar{Q}_j h - \sum P_i h) \quad \dots\dots(7.6)$$

例えば、図7-2の骨組における1, 2層の層モーメントの釣合は、次式で与えられる。ここでは、水平方向の荷重が無いことから、層モーメントの釣合でも、右辺項はゼロとなる。

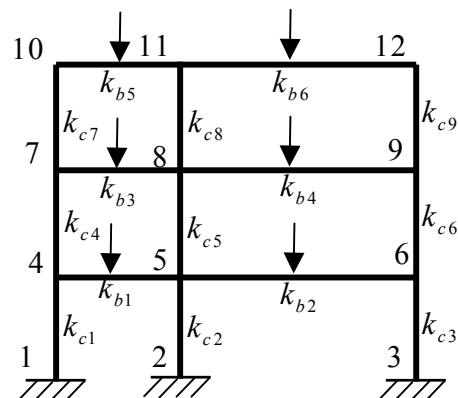


図7-2 解析用骨組

$$\begin{aligned}
 k_{c1}\varphi_4 + k_{c2}\varphi_5 + k_{c3}\varphi_6 + \frac{2}{3}(k_{c1} + k_{c2} + k_{c3})\psi_1 &= 0 \\
 k_{c4}\varphi_4 + k_{c5}\varphi_5 + k_{c6}\varphi_6 + k_{c4}\varphi_7 + k_{c5}\varphi_8 + k_{c6}\varphi_9 + \\
 \frac{2}{3}(k_{c4} + k_{c5} + k_{c6})\psi_2 &= 0
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} k_{c1}\varphi_4 + k_{c2}\varphi_5 + k_{c3}\varphi_6 + \frac{2}{3}(k_{c1} + k_{c2} + k_{c3})\psi_1 = 0 \\ k_{c4}\varphi_4 + k_{c5}\varphi_5 + k_{c6}\varphi_6 + k_{c4}\varphi_7 + k_{c5}\varphi_8 + k_{c6}\varphi_9 + \frac{2}{3}(k_{c4} + k_{c5} + k_{c6})\psi_2 = 0 \end{aligned}} \right\} \dots\dots(7.7)$$

上で求めた釣合式を参考にして、次の表中に剛比と固定端モーメントを代入し、全体釣合式を作成してみよう。未知数は、節点数+層数であり、ここでは、境界条件によって、 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ が零であることから、未知数は12となる。

表 7-1 機械的作表法で作った解析用骨組の釣合式

	節点	φ_4	φ_5	φ_6	φ_7	φ_8	φ_9	φ_{10}	φ_{11}	φ_{12}	ψ_1	ψ_2	ψ_3	右辺項
節点方程式	4	J_4	k_{b1}		k_{c4}						k_{c1}	k_{c4}		C_{45}
	5	k_{b1}	J_5	k_{b2}		k_{c5}					k_{c2}	k_{c5}		$-C_{54} + C_{56}$
	6		k_{b2}	J_6			k_{c6}				k_{c3}	k_{c6}		$-C_{65}$
	7	k_{c4}			J_7	k_{b3}		k_{c7}				k_{c4}	k_{c7}	C_{78}
	8		k_{c5}		k_{b3}	J_8	k_{b4}		k_{c8}			k_{c5}	k_{c8}	$-C_{76} + C_{78}$
	9			k_{c6}		k_{b4}	J_9			k_{c9}		k_{c6}	k_{c9}	$-C_{87}$
	10				k_{c7}			J_{10}	k_{b5}				k_{c7}	$C_{10,11}$
	11					k_{c8}		k_{b5}	J_{11}	k_{b6}			k_{c8}	$-C_{11,10} + C_{11,12}$
	12						k_{c9}		k_{b6}	J_{12}			k_{c9}	$-C_{12,11}$
層方程式	1層	k_{c1}	k_{c2}	k_{c3}							N_1			0
	2層	k_{c4}	k_{c5}	k_{c6}	k_{c4}	k_{c5}	k_{c6}					N_2		0
	3層				k_{c7}	k_{c8}	k_{c9}	k_{c7}	k_{c8}	k_{c9}			N_3	0

上表で、節点方程式の剛性対角項は、各々、当該節点に連結する部材剛比の総和の2倍(J)であり、また、層方程式では、その層にある柱剛比の総和の2/3の値(N)である。

表 7-1 を参考にして、たわみ角法による全体剛性行列の特徴を説明する。この剛性は対称行列であり、規則的に各部材の剛比が並んでいることが分かる。節点方程式の対角項は、当該節点に連結している部材剛比の総和の2倍となっている。対角項の両隣には、骨組と同じで両隣の梁の剛比が入る。骨組の左右端には梁がないので、係数に飛びが生じるので注意。上下の柱の剛比は、上階及び下階の未知番号部分に入る。

層方程式の対角項は、その層に存在する柱剛比の総和の2/3倍の値となる。非対角項では、各柱部材が所属する層で、上下の未知番号(節点番号)の位置に挿入される。この配置も順序良く配置される。また、剛

性行列が対称であることから、節点方程式から係数を決めても良い。剛性行列の特徴を再度まとめて、次の表で示す。

表 7-2 たわみ角法による剛性行列の特徴

	2階節点	3階節点	R階節点	各層
節点方程式				
層方程式				

機械的作表法でも、固定境界以外も有効剛比を使用することができる。支持点がピンの場合は、第1層の柱の剛比を有効剛比に替えて、また、対称条件や逆対称条件も同様に有効剛比を使用すれば良い。

7.3 荷重項

節点方程式における荷重項は、柱・梁に部材荷重がある場合に生じる。部材の基本応力を計算し、固定端モーメントを連結した節点で和をとることによって荷重項が得られる。その際、部材両端で固定端モーメントの正負が異なるので注意しなければならない。

層方程式における荷重項は、荷重の加わり方で異なるので、ここでは、次のように分類して説明する。

- 1) 水平方向荷重が各床の節点に加わる場合
- 2) 柱に部材荷重が加わり、水平荷重となる場合

図 7-3 のように、水平荷重が各床レベルの節点に加わる場合は、比較的容易に層方程式の荷重項を作成することができる。各層方程式の荷重項は、その層より上の水平荷重の和をとり、当該層の高さをかける事で得られる。

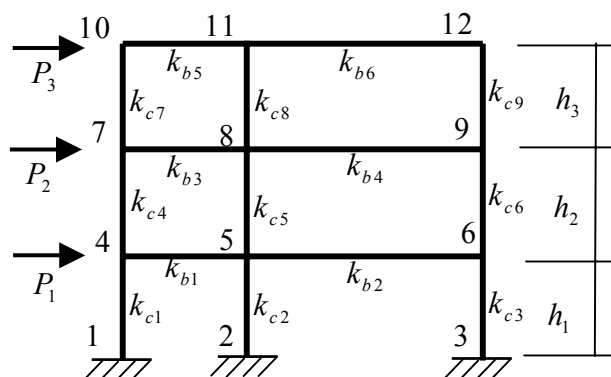


図 7-3 水平荷重を受ける骨組

図 7-3 の水平荷重を受ける骨組の層方程式の荷重項は以下のように得られる。

表 7-3 荷重項 1

層方程式	層	荷重項
層方程式	1	$-(P_1 + P_2 + P_3)h_1/3$
	2	$-(P_2 + P_3)h_2/3$
	3	$-(P_3)h_3/3$

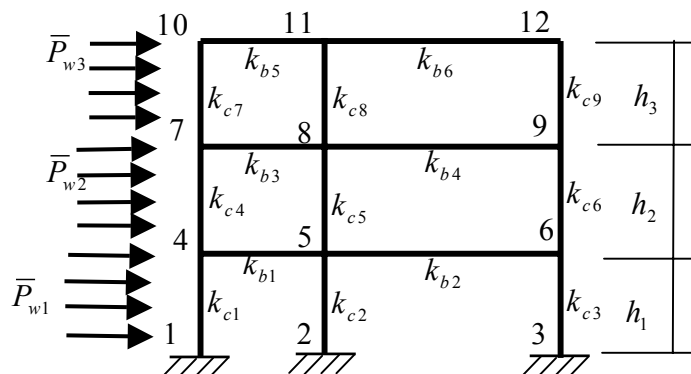


図 7-4 水平荷重を受ける骨組

次に、図 7-4 のように、柱に部材荷重が加わっている場合について考えよう。ここでは、骨組の左側より、等分布荷重が加わっているものとしている。まず、柱の基本応力 C, M_0, Q を計算し、せん断力に釣合っている固定端外力を梁の両端の節点に割り振る。図 7-4 では、等分布荷重であるため、図 7-5 のように節点水平外力と等価となる。

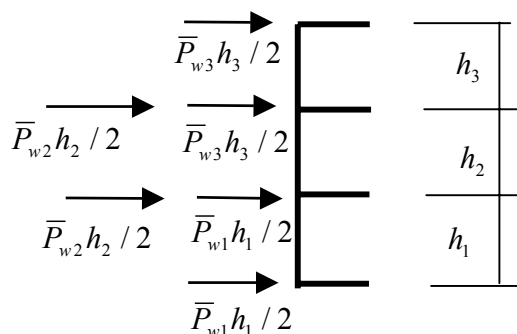


図 7-5 分布水平荷重を等価な節点荷重に変換

後は、前の節点荷重と同様に、層方程式の荷重項は、当該層より上の荷重の総和にその層の高さをかけて求めることになる。図 7-4 の骨組と荷重では、以下のような層方程式の荷重項となる。

上記のように、柱に部材荷重がある場合、節点方程式の荷重項にも柱の固定端モーメントが加わることに注意されたい。例えば、図 7-4 の例では、表 7-4(b) の荷重項となる。

表 7-4(a) 荷重項 2

層方程式	層	荷重項
層方程式	1	$-(\bar{P}_{w3}h_3 + \bar{P}_{w2}h_2 + \bar{P}_{w1}h_1/2)h_1/3$
	2	$-(\bar{P}_{w3}h_3 + \bar{P}_{w2}h_2/2)h_2/3$
	3	$-(\bar{P}_{w3}h_3/2)h_3/3$

表 7-4(b) 節点方程式の荷重項

節点番号	荷重項
4	$-\frac{\bar{P}_{w1}h_1}{12} + \frac{\bar{P}_{w2}h_2}{12}$
5	0
6	0
7	$-\frac{\bar{P}_{w2}h_2}{12} + \frac{\bar{P}_{w3}h_3}{12}$
8	0
9	0
10	$-\frac{\bar{P}_{w3}h_3}{12}$
11	0
12	0

7.4 例題

例題を用いて、機械的作表を理解しよう。例題の骨組は、図 7-6 に示す 2 層 2 スパンの骨組で、境界条件は固定支持である。節点番号の振り方、及び、部材の剛比は図に示されている。荷重や剛比は、現実の骨組とは異なり、計算し易いように設定されている。

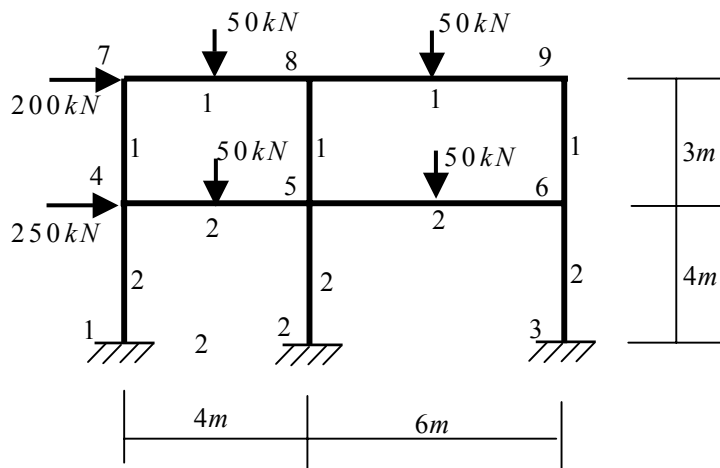


図 7-6 例題の骨組と荷重

最初に、鉛直荷重による基本応力を求める。基本応力は、部材長さが異なる 2 種の梁について、以下のように計算される。

部材長さ : 4m

$$\left. \begin{aligned} C_4 &= \frac{PL}{8} = \frac{50 \cdot 4}{8} = 25kNm \\ M_0 &= \frac{PL}{4} = 50kNm \\ Q &= \frac{P}{2} = 25kN \end{aligned} \right\} \dots\dots(7.8)$$

部材長さ : 6m

$$\left. \begin{aligned} C_6 &= \frac{PL}{8} = \frac{50 \cdot 6}{8} = 37.5kNm \\ M_0 &= \frac{PL}{4} = 75kNm \\ Q &= \frac{P}{2} = 25kN \end{aligned} \right\} \dots\dots(7.9)$$

図 7-6 に示す骨組の未知数は、節点 1, 2, 3 は固定支持であるため、回

転角が6自由度であり、また、層の部材角が2自由度で、計8自由度である。また、荷重項には、鉛直方向の部材荷重と節点水平荷重があるため、節点方程式にも層方程式にも値が入ることになる。以下に、表7-2を参照して、全体釣合式を構築する。

表 7-5 例題の骨組の全体釣合式

		φ_4	φ_5	φ_6	φ_7	φ_8	φ_9	ψ_1	ψ_2	荷重項
節点方程式	4	10	2		1			2	1	25
	5	2	14	2		1		2	1	12.5
	6		2	10			1	2	1	-37.5
	7	1			4	1			1	25
	8		1		1	6	1		1	12.5
	9			1		1	4		1	-37.5
層方程式	1層	2	2	2				4		-600
	2層	1	1	1	1	1	1		2	-200

後は、上の8元の連立方程式を解いて、骨組節点の回転角と柱の部材角を求める。この変位をたわみ角法の基本式に代入し、部材両端の材端力を求める。後の操作は、前章で学習した方法と同じである。

7.5 課題

本章では、SPACE を用いて、前節の例題について数値解析を実施し、たわみ角法で求めた結果と比較する。再度、前節の例題を以下に示す。ただし、鋼材はSS400 を使用し、部材断面は全て H-400x200x8x13 を使用するものとする。また、スパンは4mと6mとし、階高は4m、3mとする。使用する部材の断面二次モーメントは 23500 cm^4 であり、ヤング係数は 20500 kN/cm^2 とする。ただし、SPACE のデータベースより求めた値である。

骨組全体の釣合式は、表7-5に求められ

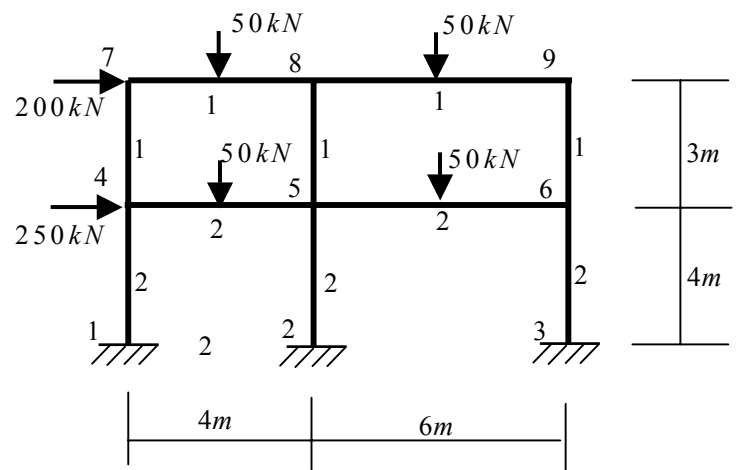


図 7-7 例題の骨組と荷重

ている。ここでは、添付ファイルの Excel VBA による連立方程式を解くプログラムを用いる。その結果が、図 7-8 に示されており、得られた結果が次式に示される。

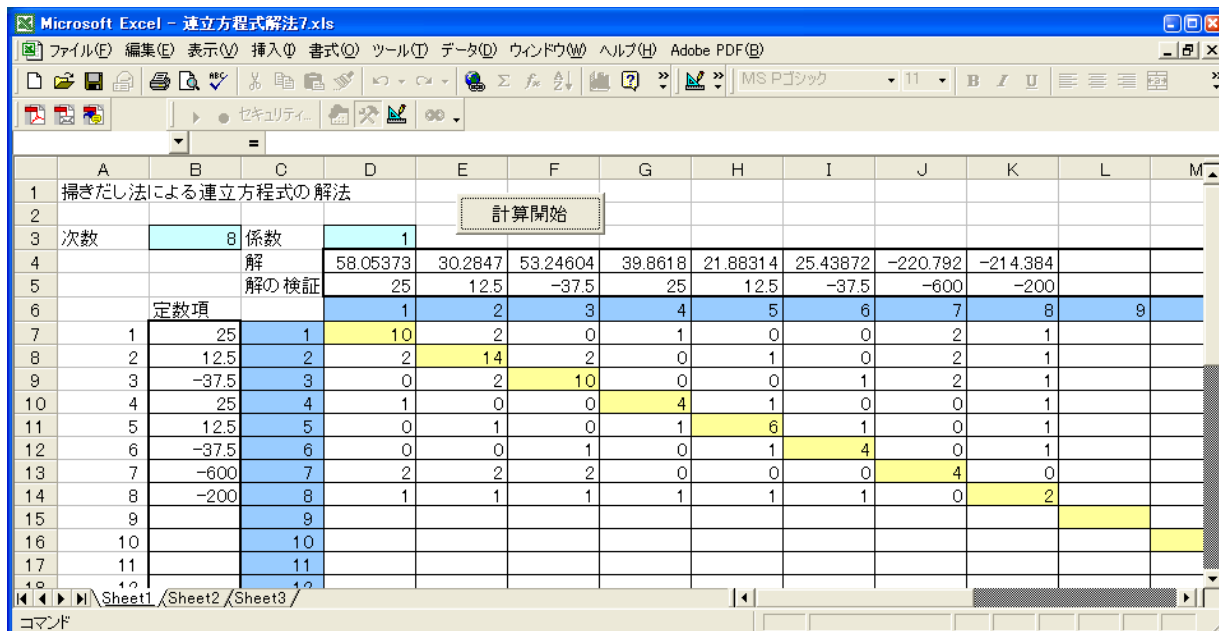


図 7-8 Excel の VBA による連立方程式の解法

$$\begin{pmatrix} \varphi_4 \\ \varphi_5 \\ \varphi_6 \\ \varphi_7 \\ \varphi_8 \\ \varphi_9 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 58.05 \\ 30.28 \\ 53.24 \\ 39.86 \\ 21.88 \\ 25.44 \\ -220.79 \\ -214.38 \end{pmatrix} \quad \dots\dots(7.10)$$

上の変位を各部材のたわみ角法の基本式に代入し、部材の材端モーメントを求める。まず、柱の材端モーメントは、

$$\begin{aligned}
 M_{14} &= 2(\varphi_4 + \psi_1) = 2(58.05 - 220.79) = -325.48kNm \\
 M_{41} &= 2(2\varphi_4 + \psi_1) = 2(2 \cdot 58.05 - 220.79) = -209.38kNm \\
 M_{25} &= 2(\varphi_5 + \psi_1) = 2(30.28 - 220.79) = -381.02kNm \\
 M_{52} &= 2(2\varphi_5 + \psi_1) = 2(2 \cdot 30.28 - 220.79) = -320.46kNm \\
 M_{36} &= 2(\varphi_6 + \psi_1) = 2(53.24 - 220.79) = -335.10kNm \\
 M_{63} &= 2(2\varphi_6 + \psi_1) = 2(2 \cdot 53.24 - 220.79) = -228.62kNm
 \end{aligned} \quad \dots\dots(7.11a)$$

$$\begin{aligned}
 M_{47} &= 1(2\varphi_4 + \varphi_7 + \psi_2) = 2 \cdot 58.05 + 39.86 - 214.38 = -58.42kNm \\
 M_{74} &= 1(2\varphi_7 + \varphi_4 + \psi_2) = 2 \cdot 39.86 + 58.05 - 214.38 = -76.61kNm \\
 M_{58} &= 1(2\varphi_5 + \varphi_8 + \psi_2) = 2 \cdot 30.28 + 21.88 - 214.38 = -131.94kNm \\
 M_{85} &= 1(2\varphi_8 + \varphi_5 + \psi_2) = 2 \cdot 21.88 + 30.28 - 214.38 = -140.34kNm \\
 M_{69} &= 1(2\varphi_6 + \varphi_9 + \psi_2) = 2 \cdot 53.24 + 25.44 - 214.38 = -82.46kNm \\
 M_{96} &= 1(2\varphi_9 + \varphi_6 + \psi_2) = 2 \cdot 25.44 + 53.24 - 214.38 = -110.26kNm
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} M_{47} \\ M_{74} \\ M_{58} \\ M_{85} \\ M_{69} \\ M_{96} \end{aligned}} \right\} \dots\dots(7.11b)$$

次に、梁の材端モーメントは次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 M_{45} &= 2(2\varphi_4 + \varphi_5) - C_4 = 2(2 \cdot 58.05 + 30.28) - 25 = 267.76kNm \\
 M_{54} &= 2(2\varphi_5 + \varphi_4) + C_4 = 2(2 \cdot 30.28 + 58.05) + 25 = 262.22kNm \\
 M_{56} &= 2(2\varphi_5 + \varphi_6) - C_6 = 2(2 \cdot 30.28 + 53.24) - 37.5 = 190.10kNm \\
 M_{65} &= 2(2\varphi_6 + \varphi_5) + C_6 = 2(2 \cdot 53.24 + 30.28) + 37.5 = 311.02kNm \\
 M_{78} &= 1(2\varphi_7 + \varphi_8) - C_4 = 2 \cdot 39.86 + 21.88 - 25 = 76.6kNm \\
 M_{87} &= 1(2\varphi_8 + \varphi_7) + C_4 = 2 \cdot 21.88 + 39.86 + 25 = 108.62kNm \\
 M_{89} &= 1(2\varphi_8 + \varphi_9) - C_6 = 2 \cdot 21.88 + 25.44 - 37.5 = 31.7kNm \\
 M_{98} &= 1(2\varphi_9 + \varphi_8) + C_6 = 2 \cdot 25.44 + 21.88 + 37.5 = 110.26kNm
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} M_{45} \\ M_{54} \\ M_{56} \\ M_{65} \\ M_{78} \\ M_{87} \\ M_{89} \\ M_{98} \end{aligned}} \right\} \dots\dots(7.12)$$

上式と、式(7.8)と(7.9)を用いると、梁中央の曲げモーメントは、次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 M_{c45} &= M_0 - 0.5(M_{54} - M_{45}) = 50 - 0.5(262.22 - 267.76) = 52.77kNm \\
 M_{c56} &= M_0 - 0.5(M_{65} - M_{56}) = 75 - 0.5(311.02 - 190.10) = 14.54kNm \\
 M_{c78} &= M_0 - 0.5(M_{78} - M_{87}) = 50 - 0.5(108.62 - 76.6) = 33.99kNm \\
 M_{c89} &= M_0 - 0.5(M_{89} - M_{98}) = 75 - 0.5(110.26 - 31.7) = 35.72kNm
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} M_{c45} \\ M_{c56} \\ M_{c78} \\ M_{c89} \end{aligned}} \right\} \dots\dots(7.13)$$

上の材端モーメントを用いて、部材のせん断力を求める。まず、柱は、式(7.11)より、次式となる。

$$\begin{aligned}
 Q_{14} &= -(M_{14} + M_{41})/h_1 = (325.48 + 209.38)/4 = 133.7kN \\
 Q_{25} &= -(M_{25} + M_{52})/h_1 = (381.02 + 320.46)/4 = 175.4kN \\
 Q_{36} &= -(M_{36} + M_{63})/h_1 = (335.10 + 228.62)/4 = 140.9kN \\
 Q_{47} &= -(M_{47} + M_{74})/h_2 = (58.42 + 76.61)/3 = 45.0kN \\
 Q_{58} &= -(M_{58} + M_{85})/h_2 = (131.94 + 140.34)/3 = 90.8kN \\
 Q_{69} &= -(M_{69} + M_{96})/h_2 = (82.46 + 110.26)/3 = 64.2kN
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} Q_{14} \\ Q_{25} \\ Q_{36} \\ Q_{47} \\ Q_{58} \\ Q_{69} \end{aligned}} \right\} \dots\dots(7.14)$$

上式で、各層の層せん断力を計算すると、第1層では450kN、第2層では200kNとなり、外力と釣合っていることが分かる。

次に、梁のせん断力を求める。梁は、全て梁中央に集中荷重が加わっているため、せん断力は、梁を2つに分けて、式(7.12)と(7.13)を用い

て計算する。

$$\begin{aligned}
 Q_{4c} &= -2(M_{45} - M_{c45})/l_1 = -(267.76 - 52.77)/2 = -107.5kN \\
 Q_{c5} &= -2(M_{c45} + M_{54})/l_1 = -(52.77 + 262.22)/2 = -157.5kN \\
 Q_{5c} &= -2(M_{56} - M_{c56})/l_2 = -(190.10 - 14.54)/3 = -58.5kN \\
 Q_{c6} &= -2(M_{c56} + M_{65})/l_2 = -(14.54 + 311.02)/3 = -108.5kN \\
 Q_{7c} &= -2(M_{78} - M_{c78})/l_1 = -(76.6 - 33.99)/2 = -21.3kN \\
 Q_{c8} &= -2(M_{c78} + M_{87})/l_1 = -(33.99 + 108.62)/2 = -71.3kN \\
 Q_{8c} &= -2(M_{89} - M_{c89})/l_2 = -(31.7 - 35.72)/3 = 1.34kN \\
 Q_{c9} &= -2(M_{c89} + M_{98})/l_2 = -(35.72 + 110.26)/3 = -48.7kN
 \end{aligned}
 \quad \dots\dots(7.15)$$

次に、部材の軸力であるが、先に述べたように、たわみ角法では軸方向の変位を無視しているため、自動的に決定できない。そこで、各節点で、外力とせん断力、及び、軸力との力の釣合より求めることになり、左上の節点より順次計算すればよい。これは、読者の演習とする。

以上の計算で求めた曲げモーメント、せん断力、軸力より、骨組の曲げモーメント図、及び、せん断力図、軸力図を以下に示す。

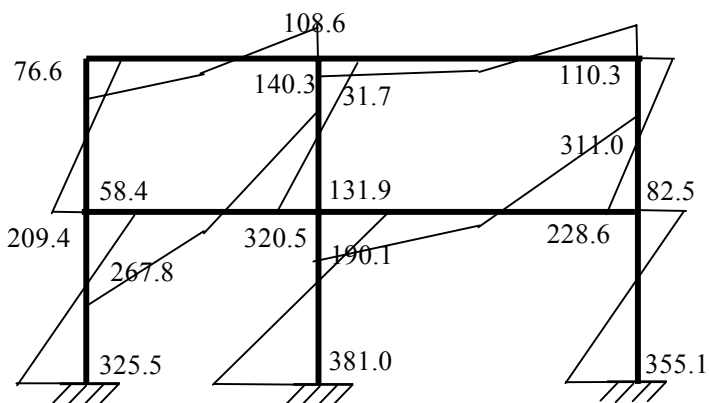


図 7-9(a) 曲げモーメント図

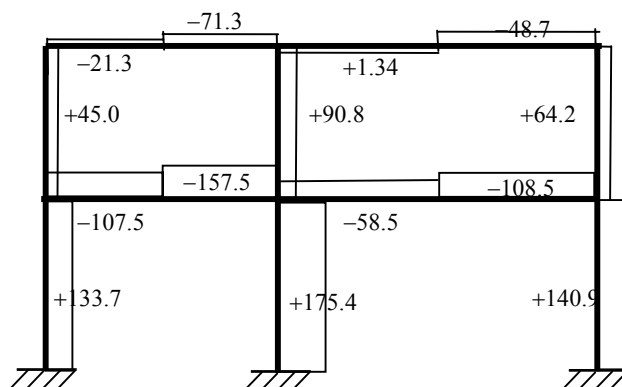


図 7-9(b) せん断力図

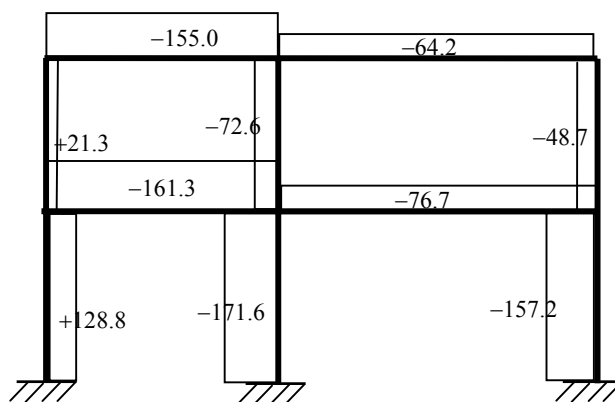


図 7-9(c) 軸力図

各層の床位置における水平変位は、部材角を用いて次式で求められる。

$$\begin{aligned}
 K_0 &= \frac{2EI}{h_2} = \frac{2 \cdot 20500 \cdot 23500}{300} = 3.212 \cdot 10^6 \\
 \delta_1 &= R_1 h_1 = \frac{-\psi_1 h_1}{-3K_0} = \frac{220.79 \cdot 100 \cdot 4 \cdot 100}{3 \cdot 3.212 \cdot 10^6} = \frac{8.832 \cdot 10^6}{9.636 \cdot 10^6} = 0.917 \text{ cm} \\
 \delta_2 &= \delta_1 + R_2 h_2 = 1.22 + \frac{-\psi_2 h_2}{-3K_0} \\
 &= 0.917 + \frac{214.38 \cdot 100 \cdot 3 \cdot 100}{3 \cdot 3.212 \cdot 10^6} = 0.917 + \frac{6.431 \cdot 10^6}{9.636 \cdot 10^6} = 1.584 \text{ cm}
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \delta_1 \\ \delta_2 \end{aligned}} \right\} \dots\dots(7.16)$$

次に、SPACE を用いて数値計算を実施する。まず、SPACE を起動する。このSPACEの「ファイル」→「新規作成」メニューを用いて、「たわみ角法演習解析モデル」-「第7章」フォルダ内の「課題1」フォルダ中にコントロールファイルを作成する。コントロールファイルの名前を「2層2スパン骨組.ct1」としよう。その後、各種のコントロール情報を設定した後、モデラーを起動する。モデラーによる骨組の設定は、前章とほぼ同じであり、異なる部分のみ説明することになる。

最初は、初期設定ウィザードが自動的にダイアログを表示させるので、これに従ってデータを入力すれば良い。まず、図タイトルを入力し、次に平面フレームを選択し、構造物の規模として、図7-10のように「スパン数」を2に、階数は2にセットする。次に、図7-11に示すように、スパン長を400cmと600cmに、各層の階高を400cmと300cmにセットする。

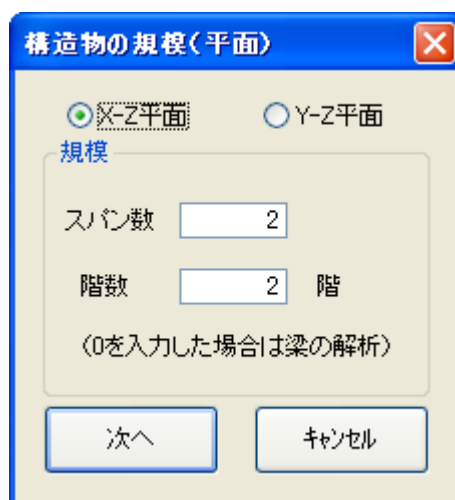


図 7-10 構造物の規模

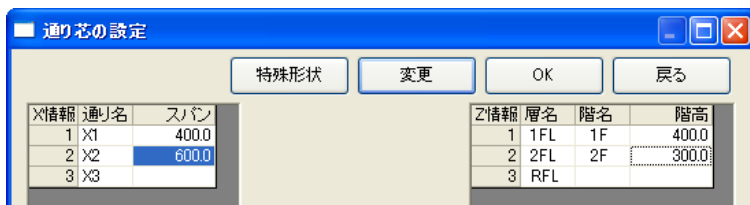


図 7-11 スパンと階高の設定

さらに、使用する部材断面を作成登録する。部材モデルでは、鉄骨を選択し、材料はSS400を、また、部材モデルは弾性とする。

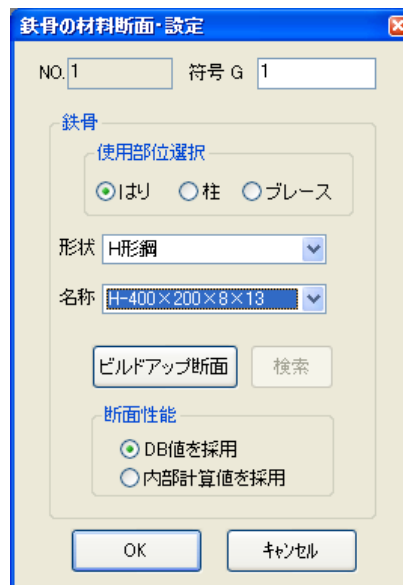


図 7-12 部材断面の設定

断面は、H-400x200x8x13 とし、DB 値を採用する。図 7-12 に示すように、梁用の断面を G1 として設定する。また、柱用は、同じ断面で設定し、記号を C1 とする。この骨組では、各層の梁・柱の剛比が異なるため、図 7-13 に示すように、柱は 2 種、梁は 4 種設定する。要素データの設定が終了後、OK ボタンを押して、CAD 画面に戻る。

モデル	符号	名称	材種	種別	形状	断面番号1	断面番号2	断面番号3
1	1 G1	H-400×200×8×13	S	SS400	H形鋼	0	0	0
2	1 G2	H-400×200×8×13	S	SS400	H形鋼	0	0	0
3	1 G3	H-400×200×8×13	S	SS400	H形鋼	0	0	0
4	1 G4	H-400×200×8×13	S	SS400	H形鋼	0	0	0
5	1 C1	H-400×200×8×13	S	SS400	H形鋼	0	0	0
6	1 C2	H-400×200×8×13	S	SS400	H形鋼	0	0	0

図 7-13 課題に合わせて要素を登録する

図 7-15 のように CAD 画面を使用して骨組を構築し、次に境界と荷重を割り付ける。梁と柱を割り付ける際、第 1 層では、C1 と G1、G2 を、第 2 層では、C2 と G3、G4 を用いる。また、柱の回転角は規定値として -90 度となっているが、平面問題では 0 度として使用する。

さらに、前章と同様に、「要素登録」機能を利用して、図 7-14 のように要素データを変更する。ここでは、たわみ角法の解析結果と比較するために、断面積を 1000 倍に、また、梁・柱の断面二次モーメントを課題の剛比に合わせるために、次の表のように変更する。

- 1 層柱 C1 : $k=2$ 、 $h_1/h_2=1.333$ ((断面二次モーメントを 2.667 倍する)
- 2 層柱 C2 : $k=1$
- 2 階梁左 G1 : $k=2$ 、 $l_1/h_2=1.333$ (断面二次モーメントを 2.667 倍する)
- 2 階梁左 G2 : $k=2$ 、 $l_2/h_2=2$ (断面二次モーメントを 4 倍する)
- R 階梁 G3 : $k=1$ 、 $l_1/h_2=1.333$ (断面二次モーメントを 1.333 倍する)
- R 階梁 G4 : $k=1$ 、 $l_2/h_2=2$ (断面二次モーメントを 2 倍する)

要素番号	現在の状態	符号	モデル	ヤング係数 (kN/cm ²)	せん断弾性係数 (kN/cm ²)	断面積 (cm ²)	断面二次モーメント (cm ⁴)	軸断面二次モーメント (cm ⁴)	軸断面二次モーメント (cm ⁴)	軸回せん断 (cm ²)
1	有効	G1	1	20500.0000	7900.0000	83370.000	35.6800	47000.00000	1740.00000	...
2	有効	G2	1	20500.0000	7900.0000	83370.000	35.6800	94000.00000	1740.00000	...
3	有効	G3	1	20500.0000	7900.0000	83370.000	35.6800	23500.00000	1740.00000	...
4	有効	G4	1	20500.0000	7900.0000	83370.000	35.6800	47000.00000	1740.00000	...
5	有効	C1	1	20500.0000	7900.0000	83370.000	35.6800	62674.50000	1740.00000	...
6	有効	C2	1	20500.0000	7900.0000	83370.000	35.6800	23500.00000	1740.00000	...

図 7-14 解析モデルに合わせるために、断面特性を変更する

図7-7を参照して、解析モデルを図7-15のように構築する。ここで、荷重を鉛直方向荷重（長期化荷重）と水平方向荷重（短期荷重）に分け、前者を静的荷重1に、また、後者を静的荷重2とする。解析を行う前に、節点情報を選択して、図7-16のように荷重の状態を確認しよう。

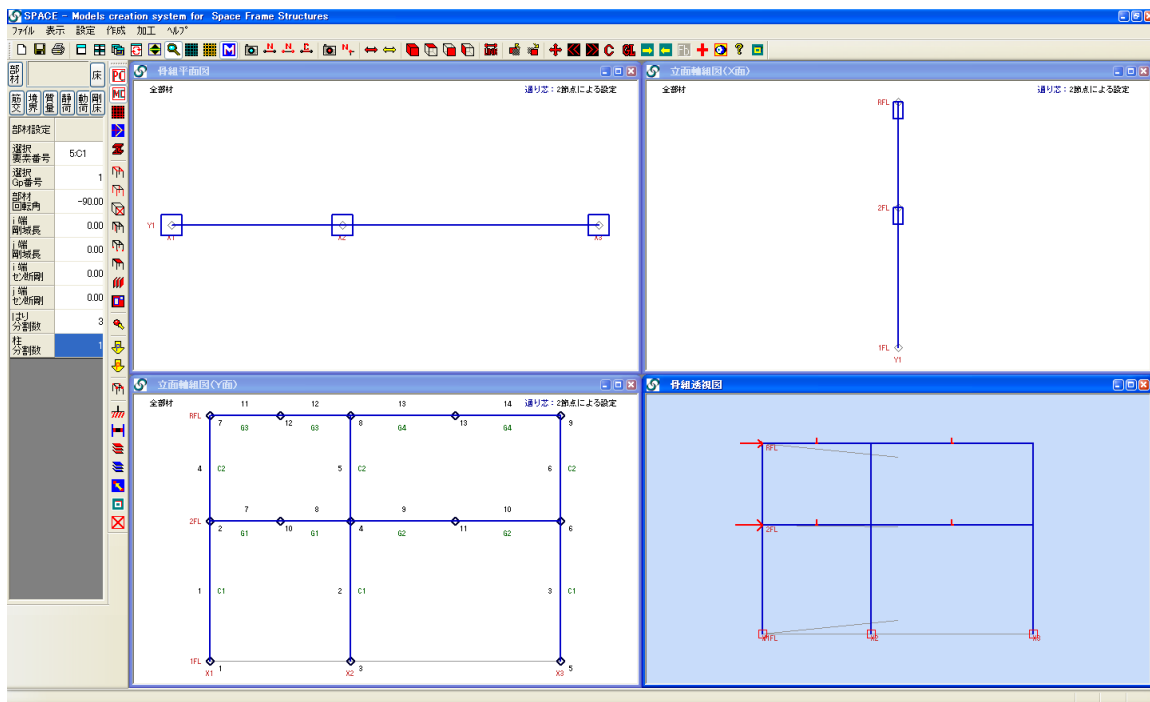


図7-15 CAD画面で解析モデルを設定する

節点情報							
座標	局所座標系	境界条件・剛床	静的荷重1	静的荷重2	動的荷重1	動的荷重2	動的荷重3
節点番号	Px	Py	Pz	Mx	My	Mz	
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
10	0.0000	0.0000	-50.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
11	0.0000	0.0000	-50.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
12	0.0000	0.0000	-50.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
13	0.0000	0.0000	-50.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

節点情報							
座標	局所座標系	境界条件・剛床	静的荷重1	静的荷重2	動的荷重1	動的荷重2	動的荷重3
節点番号	Px	Py	Pz	Mx	My	Mz	
2	250.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
7	200.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

図7-16 節点情報から荷重の状態を確認する

解析モデルを全て設定した後、メニューの「ファイル」→「ファイルへの出力」を選択し、図7-17に示すダイアログで、「構造ファイル」と「静的荷重ファイル_1」、「静的荷重ファイル_2」、情報ファイルを指定し、OKボタンを押して出力する。

解析パラメータを設定する前に、図7-18に示す形状データのファイルチェックダイアログを表示させ、静的荷重に用いる荷重として、荷重ファイルNo. 1とNo. 2に図のようにチェックマークを挿入する。

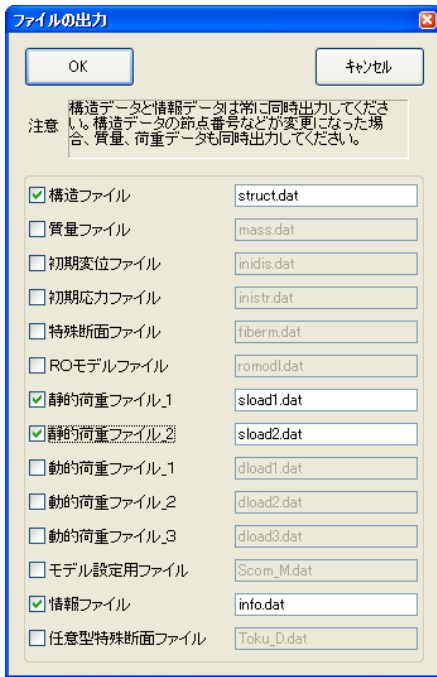


図 7-17 解析モデルの情報をファイルへ出力

解析用パラメータとして、図 7-19 と 7-20 を示すように各種の情報を設定する。特に、図 7-19 の荷重増分用の段階数を 2 とし、それに合わせて、荷重増分段階の 1、2

次に、解析パラメータを設定する前に、形状データのファイルチェックダイアログで、図 7-17 のように 2 つの荷重ファイルにチェックマークを入れる。この操作によって、今回の静的解析では、2 つの荷重が加えられることになる。



図 7-18 形状データファイルダイアログで、2 つの荷重ファイルをチェックする



図 7-19 静的解析解析用コントロールデータ

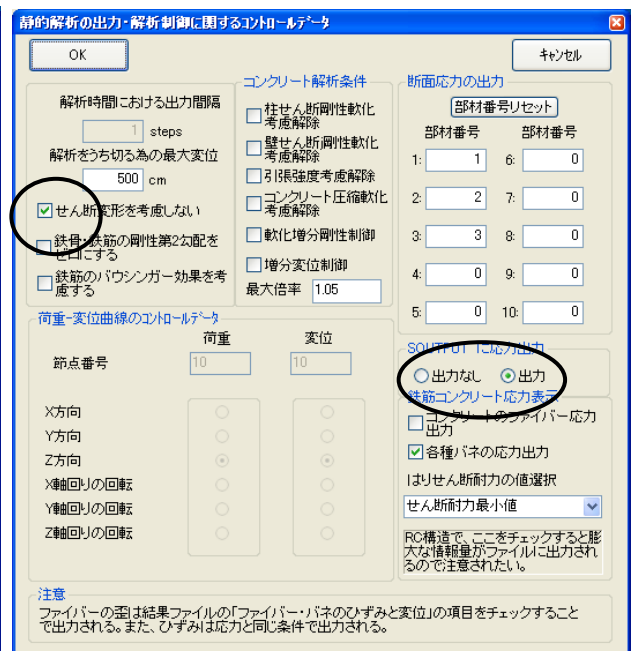


図 7-20 静的解析の出力・解析制御に関するコントロールデータ

のそれぞれで20ステップずつセットし、また、荷重係数の欄には、ステップ1では、S1の欄に0.05、ステップ2では、S2の欄に0.05とする。この設定によって、最初、鉛直方向荷重が加わり、その後、水平荷重が加わることになる。

解析パラメータを設定した後、静的ソルバーを起動し、線形解析を実施する。解析が正常終了した後、解析結果を出力表示で確認する。SPACEのメニューより、「表示」→「静的解析の途中経過の表示」を選択し、解析経過と結果を表示させる。ファイルの最後に出力されている40回目の解析結果を図7-21に示す。たわみ角法で求めた図7-9の結果と、下図の断面力は良い一致を示している。

材番号	部材モデル	Nx	Qy	Qz	Mx	My	Mz
1	1	128.8096	0.0000	-133.7182	0.0000	32549.7156	0.0000
		128.8096	0.0000	-133.7182	0.0000	-20937.5730	0.0000
2	1	-171.6118	0.0000	-175.3663	0.0000	38102.1802	0.0000
		-171.6118	0.0000	-175.3663	0.0000	-32044.3209	0.0000
3	1	-157.1940	0.0000	-140.9172	0.0000	33508.5424	0.0000
		-157.1940	0.0000	-140.9172	0.0000	-22858.3421	0.0000
4	1	21.3008	0.0000	-45.0010	0.0000	5841.1837	0.0000
		21.3008	0.0000	-45.0010	0.0000	-7659.1105	0.0000
5	1	-72.6347	0.0000	-90.7544	0.0000	13193.3344	0.0000
		-72.6347	0.0000	-90.7544	0.0000	-14032.9812	0.0000
6	1	-48.6644	0.0000	-64.2455	0.0000	8246.6067	0.0000
		-48.6644	0.0000	-64.2455	0.0000	-11027.0362	0.0000
7	1	-161.2819	0.0000	107.5081	0.0000	-26778.7567	0.0000
		-161.2819	0.0000	107.5081	0.0000	-5277.1417	0.0000
8	1	-161.2819	0.0000	157.5081	0.0000	-5277.1417	0.0000
		-161.2819	0.0000	157.5081	0.0000	26224.4735	0.0000
9	1	-76.6708	0.0000	58.5302	0.0000	-19013.1818	0.0000
		-76.6708	0.0000	58.5302	0.0000	-1454.1166	0.0000
10	1	-76.6708	0.0000	108.5302	0.0000	-1454.1166	0.0000
		-76.6708	0.0000	108.5302	0.0000	31104.9489	0.0000
11	1	-154.9988	0.0000	21.3004	0.0000	-7659.1105	0.0000
		-154.9988	0.0000	21.3004	0.0000	-3399.0324	0.0000
12	1	-154.9988	0.0000	71.3004	0.0000	-3399.0324	0.0000
		-154.9988	0.0000	71.3004	0.0000	10861.0458	0.0000
13	1	-64.2451	0.0000	-1.3350	0.0000	-3171.9354	0.0000
		-64.2451	0.0000	-1.3350	0.0000	-3572.4497	0.0000
14	1	-64.2451	0.0000	48.6650	0.0000	-3572.4497	0.0000
		-64.2451	0.0000	48.6650	0.0000	11027.0362	0.0000

図 7-21 課題の静的解析結果である部材断面力

次に静的プレゼンターを起動し、図 7-22 に示すようにせん断力図と曲げモーメント図を表示させる。下右図とたわみ角法で求めた図 7-9 の曲げモーメント分布とせん断力分布は一致している。同図の左は解析 20 回目の断面力分布を示し、鉛直方向荷重が加わった際の応答である。また右は鉛直荷重に水平荷重が加わった場合の断面力分布を示している。

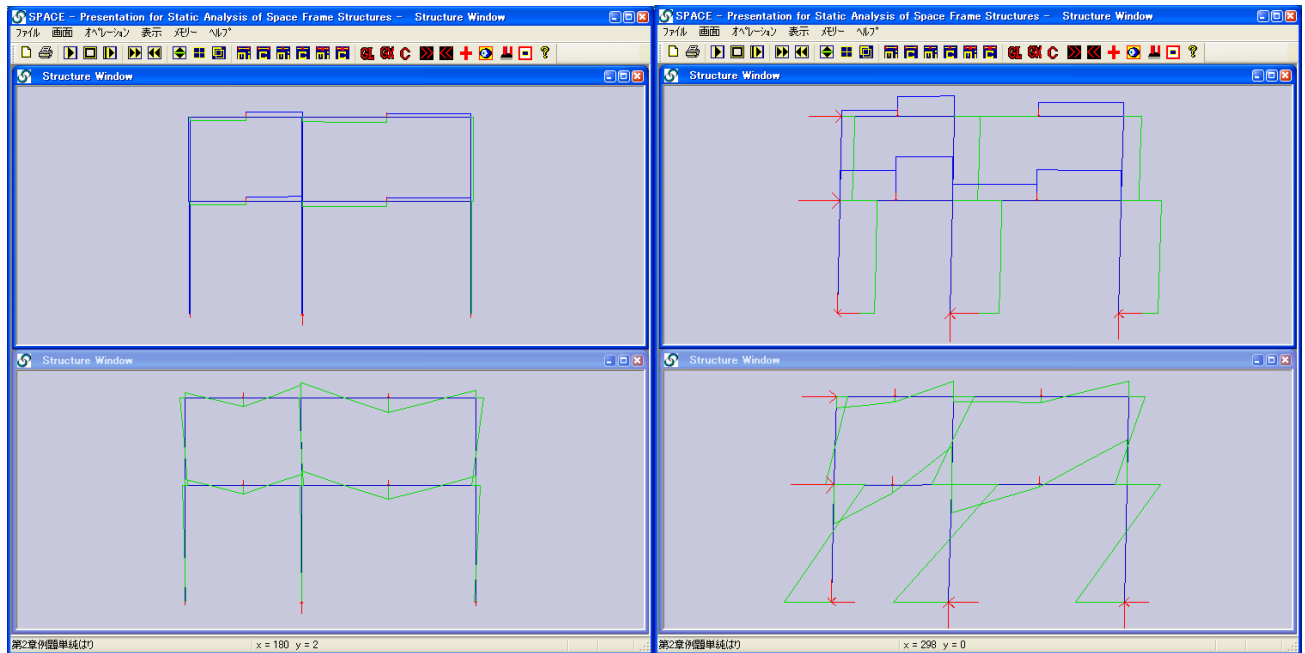


図 7-22 課題のせん断力分布と曲げモーメント分布

さらに、図 7-22 の柱頭位置で、Ctrl キーとマウス右ボタンを同時にクリックすることで、図 7-23 のダイアログを表示させ、その節点の解析結果の情報を観察する。このダイアログから分かるように、各層の水平変位は、式(7.14)に示される節点変位と同じ値となっている。

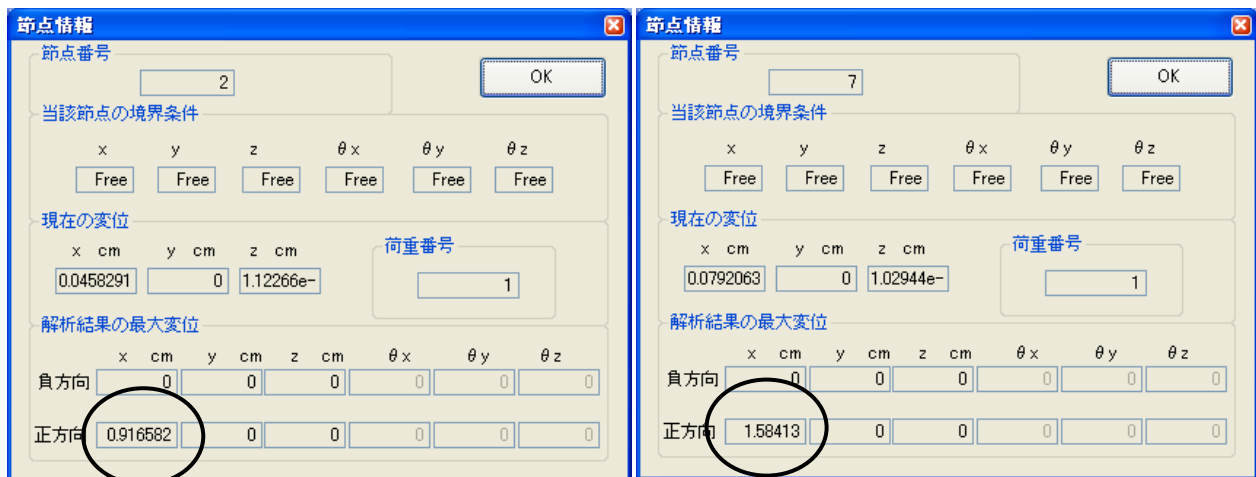
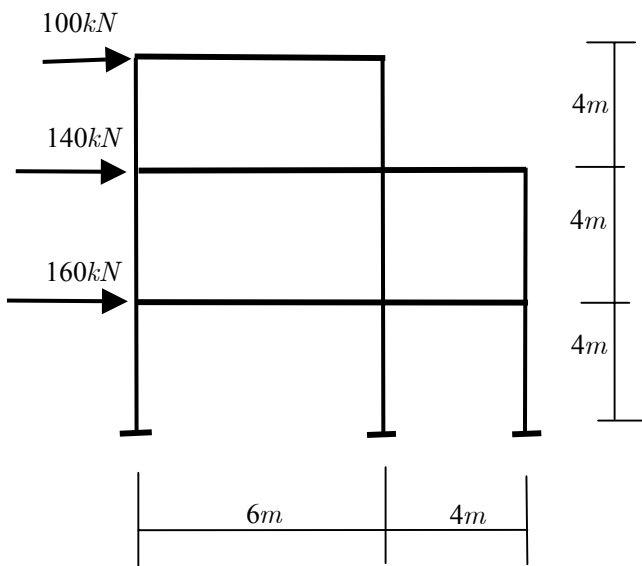


図 7-23 各層柱頭の水平方向変位

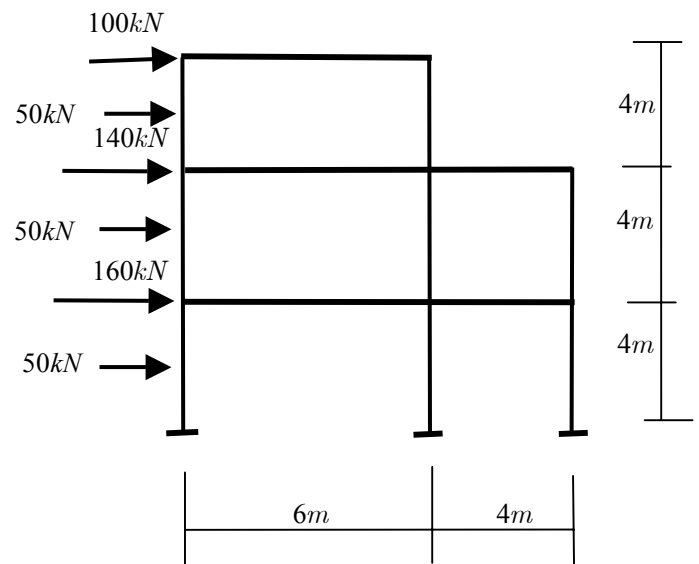
本章では、多層・多スパンの整形骨組に対し、機械的にたわみ角法の釣合式を作成する手法を学んだ。この方法によれば、比較的大きな骨組でも、容易に釣合式が得られる。さらに、SPACE を用いて例題を数値計算し、たわみ角法で計算した結果と比較して、互いにその結果を検証した。

7.7 問題

問題 7-1 次の骨組の応力解析をたわみ角法で実行し、曲げモーメント図、せん断力図及び軸力図を描き、さらに、反力を求めて、外力と反力との力の釣合を確認せよ。なお、鋼材はSS400 を使用し、部材断面として、梁は全てH-400x200x8x13 を、柱は□125x25x12 を使用するものとする。また、SPACE を用いて、同上の解析を実施し、互いの結果を比較することで、たわみ角法の結果を検証しなさい。(断面二次モーメントやヤング係数は、SPACE のデータベースの値を用いなさい。また、設定した断面より、剛比を計算して、たわみ角法を適用しなさい。)



問 7-1



問 7-2

注意：問 7-2 では、柱の中央に集中荷重として、50kN の部材荷重が加わっている。