水平力を受ける鉄筋コンクリート架構の剛域に関する研究

STUDY ON THE RIGID ZONE OF REINFORCED CONCRETE FRAMES UNDER HORIZONTAL LOADING

北川 淳 —*1 大築和夫 —*2
鈴木邦康 —*3

Atsushi KITAGAWA —*1 Kazuo OTSUKI —*2
Kuniyasu SUZUKI —*3

キーワード：
剛域, 鉄筋コンクリート架構, 有限要素法, 剛性法

Keywords:
Rigid zone, Reinforced concrete frames, Finite element method, Stiffness method

The purpose of this paper is to clarify the rigid zone lengths for reinforced concrete members. The rigid zone lengths were calculated from the results of finite element analysis of beam-column members. The equations to estimate the rigid zone lengths were derived to utilize those rigid zone lengths. The estimated rigid zone lengths were applied to the 3-spans 9-stories reinforced concrete frame, and those frames were analyzed by stiffness method. The results of the analysis were very much in agreement with the results of finite element analysis of those frames.

1. はじめに

著者らは拙論¹⁾において、鉄筋コンクリート架構に対する既往の応力及び変形解法の精度について、二次元有限要素法解析値との比較により検討した。その結果、部材伸縮及び剛域を考慮しない解法では大きな誤差を招く場合があること、曲げ・せん断・部材伸縮及びRC剛域²⁾を考慮した剛性法による解析値が最も有限要素法解析値に近似すること等を明らかにした。また、上記の剛性法によっても変位に関しては最上階あるいは最下階で、応力に関しては一部で有限要素法解析値に近似しない部分が見られ、これらは剛域算定法を変えらるることにより改善される可能性のあることも指摘した。

RC剛域長さは、奥田氏の研究³⁾に基づくものであり、柱、梁に関係なく、単にその部材とそれに接続する部材のせいによって決めるとしている。しかし、剛域長さは応力状態によっても変わり⁴⁾、更に、その部材の幅とその材に接続する部材のそれとの関係、あるいは接続部材の状況によっても変わると考えられる。また、RC剛域算定法は手計算を前提とし、簡便さを第一としているが、構造解析手段が手計算からコンピューターへと移行した今日、その算定法が多少複雑であっても、構造物の解析精度を向上させるものであれば、十分有用であると考えられる。

このような視点に立ち、本論では剛域を取り入れて線材置換される構造物の解析精度を高めることを目的として、柱梁からなるモデルを三次元有限要素法解析し、その結果に基づいて簡易な剛域算定式を提示する。さらに、平面架構について二次元有限要素法及び剛域を取り入れた剛性法による解析を行い、両者の比較により提案式

による剛域長さの適合性について検証する。なお、本論は既に建築学会大会⁵⁾及び建築学会北海道支部研究報告集⁶⁾に発表したものを取りまとめ加筆したものである。

2. 三次元有限要素法解析モデル及び解析法

2.1 解析モデル

剛域算定のための解析モデルは、図-1に示すような4タイプの形状のもので、それぞれ(a)は架構中間部の柱、(b)は同外側の柱、(c)は中間階の梁、(d)は最上階または最下階の梁を想定したものである。以下では、図示の垂直部分を単に「部材」、水平部分を「直交部材」と呼び、図示の記号を用いる。

解析モデルの種別を表-1に示す。同表の部材断面のものについて、部材の両側に直交部材がある場合と片側のみにそれがあの場合の2通りを考え、基本材長を420cmとした。柱を対象としたモデル(部材幅が直交部材幅よりも大きいもの)のうち部材断面60cm×60cm、直交部材断面40cm×80cmのモデル^{**1)}については、材長を240cm, 300cm, 360cm, 420cmの4種に、梁を対象としたモデル(部材幅が直交部材幅よりも小さいもの)のうち部材断面40cm×80cm、直交部材断面60cm×60cmのモデル^{**2)}については、材長を310cm, 420cm, 600cm, 780cm, 870cmの5種に変化させた。材長を変化させたのは、材長と剛域長さとの関係を調べるためであり、材長は通常ありうる範囲のものを適当に選んだ。なお、上記の他に後述の剛域算定に用いるために、それぞれの断面の部材のみのものについて、材長 l を数種に変化させた場合についても解析した。

*1 室蘭工業大学建設システム工学科 研究生・博士(工学)
(〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

*2 室蘭工業大学建設システム工学科 教授・工博

*3 室蘭工業大学建設システム工学科 助手・工修

*1 Research Worker, Dept. of Civil Eng. and Architecture, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

*2 Prof., Dept. of Civil Eng. and Architecture, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

*3 Research Assoc., Dept. of Civil Eng. and Architecture, Muroran Institute of Technology, M. Eng.

図-1 解析モデルの形状

2.2 解析方法

解析は三次元有限要素法で行い、材端間に単位の水平変位差（単位の層間変位）を与えた場合と材端に単位の回転角を与えた場合について行った。解析に用いた単位要素は、要素内でひずみが線形変化する自由度 24 の直方体要素である。要素分割の一例として図-2 に柱を対象とした部材断面 $60\text{cm} \times 60\text{cm}$ 、直交部材断面 $40\text{cm} \times 60\text{cm}$ 、材長 420cm のモデルを示す。x 方向分割は 10cm , 12.5cm , 15cm , 12.5cm , 10cm の 5 分割、y 方向分割は片側梁部分が $40\text{cm} \times 1$, $30\text{cm} \times 4$, $20\text{cm} \times 2$, $15\text{cm} \times 2$, $10\text{cm} \times 4$ の 13 分割、柱部分が全て 10cm の 6 分割、z 方向分割は全て 10cm の 42 分割とした。その他の諸元のモデルもこのモデルに準じた分割とした。

解析に際して、単位の層間変位を与える場合は、図-2 に示す梁材軸を通る A-A 平面、B-B 平面内の全節点の z 方向変位及び B-B 平面内の全節点の y 方向変位を拘束し、x 方向への移動を止めるために B-B 平面内の D 点の x 方向変位を拘束した。外力として、A-A 平面内の全節点の y 方向に単位の変位 $\delta = 1$ を与えた。

単位の回転角を与える場合は、支持条件として、図-2 に示す梁材軸を通る B-B 平面内の全節点の z 方向変位、C-C 線上の y 方向変位及び D 点の x 方向変位を 0 とし、その他の節点は自由とした。外力条件として、A-A 平面内の全節点の z 方向に、その面が平面を保持したまま単位の回転角 $\theta = 1$ となるように変位を与えた。

なお、ここでは上下対称という条件で、上下の梁とも梁せいの $1/2$ 位置で平面を保つとして解いている。これは、前者では反曲点が部材の中央にあり、後者では部材全長に渡って曲げモーメント一定であることを意味する。即ち、ここでの解析条件は、実構造物の部材応力は両者の中間にあると考えて設定されたものである。

3. 有限要素法解析結果に基づく剛域長さ算定式の誘導

3.1 剛域長さ算定方法

(1) 単位層間変位時

表-1 解析モデルの種別

部材断面 $t_c \times D_c$ [cm × cm]	直交部材断面 $t_b \times D_b$ [cm × cm]	材長 ℓ [cm]
20 × 45	45 × 60, 50 × 80	420 但し、 **1: 240, 300, 360, 420 **2: 310, 420, 600, 780, 870
20 × 60	45 × 80	
20 × 80	20 × 45, 40 × 45, 45 × 45 35 × 60, 45 × 60, 50 × 60	
30 × 60	45 × 45, 60 × 60, 80 × 80	
30 × 80	45 × 45, 60 × 60, 80 × 80	
40 × 45	20 × 80, 50 × 80, 60 × 80 70 × 80, 80 × 80	
40 × 60	45 × 45, 60 × 60 50 × 80, 60 × 80, 70 × 80, 80 × 80	
40 × 80	45 × 45, 80 × 80 30 × 60, 40 × 60, 60 × 60**2 30 × 100, 40 × 100, 50 × 100, 60 × 100 70 × 100, 80 × 100, 90 × 100, 100 × 100	
40 × 100	50 × 100, 70 × 100, 90 × 100	
45 × 45	30 × 60, 30 × 80, 40 × 60, 40 × 80	
45 × 60	30 × 60, 30 × 80, 40 × 60, 40 × 80	
60 × 45	30 × 45, 40 × 45, 60 × 45 30 × 60, 40 × 60, 60 × 60	
60 × 60	30 × 60, 30 × 80, 30 × 100 40 × 60, 40 × 80**1, 40 × 100	
80 × 80	30 × 60, 30 × 80, 30 × 100 40 × 60, 40 × 80, 40 × 100

図-2 要素分割の一例

図-3 剛域算定の概念

図-3 (a) に示すように、単位の層間変位を与えたときの直交部材付き部材のせん断力 Q と部材のみのせん断力 Q_0 が等しくなるときの両者の材長の差から剛域長さ ℓ_s を(1)式のように算定する。

$$\ell_s = \frac{\ell - \ell_0}{2} \quad \dots (1)$$

この場合、部材のみのせん断力 Q_0 は以下のように求める。

曲げ及びせん断変形を考慮した梁理論によれば、せん断力 Q_0 と変位 δ の関係は(2)式ようになる。

$$\delta = \left(\frac{\ell^3}{12EI} + \frac{\kappa \ell}{GA} \right) Q_0 \quad \dots (2)$$

ここに、 E ：ヤング係数 (=1.0)

I ：断面2次モーメント

A ：断面積

κ ：形状係数 (=1.2)

G ：せん断弾性係数 (= $E/2(1+\nu)$)

ν ：ポアソン比 (=1/6)

ここで、 $\delta = 1$ とし、上記の値を代入すると、単位層間変位時の部材のみの場合の負担せん断力 Q_0 と材長 ℓ との関係は(3)式のような3次式になる。

$$\frac{1}{Q_0} = \left(\frac{\ell^3}{12I} + \frac{2.8\ell}{A} \right) \frac{1}{E} \quad \dots (3)$$

しかし、(3)式の値と直交部材のない部材のみの有限要素法解析結果を比較すると、両者の近似度合いは要素分割によって変化する。従って、(3)式によって得られる Q_0 を剛域長さ算定に用いることはその精度を悪くする。そこで、剛域算定に際しては部材のみの場合のFEM解析結果に基づいて、 Q_0 と ℓ との関係を(4)式のような3次式で近似させるとして各柱断面毎に係数 a 、 b 、 c 、 d を最小2乗法により求め、その式により求まる Q_0 を使用した。ここで3次式を用いたのは、(3)式に倣ったものであり、定数項 a 及び2次の項を加えたのは近似式の精度を高めるためである。

$$\frac{1}{Q_0} = a + b\ell + c\ell^2 + d\ell^3 \quad \dots (4)$$

このようにすることにより、部材のみの場合と直交部材付きの場合の分割状態はほぼ同様なので算定結果(剛域長さ)に及ぼす要素分割の影響は微小となる。

(2) 単位回転角時

図-3 (b) に示すように単位の回転角を与えたときの直交部材付き部材のモーメント M と部材のみのモーメント M_0 が等しくなるときの両者の材長の差から剛域長さ ℓ_s を先の(1)式のように算定する。

この場合、部材のみの場合の曲げモーメント M_0 は以下のように求める。

梁理論によれば材端に単位の回転角を与えたときのモーメントと材長 ℓ_0 との関係は(5)式ようになる。

$$M_0 = \frac{2EI(2\theta_A + \theta_B)}{\ell_0} \quad \dots (5)$$

ここで、 $\theta_A = \theta_B = 1$ とすると、 $1/M_0 = \ell_0/6EI$ となり、理論的には M_0 は ℓ_0 に比例することになる。しかし、FEM解析値では分割数などの関係で必ずしもそのようにはならない。

そこで、材長 ℓ_0 とモーメント M_0 の関係を(6)式のような1次式で近似させるものとする。(6)式の a は、先の場合と同様に近似式の精度を高めるために加えたものである。

$$\frac{1}{M_0} = a + b\ell_0 \quad \dots (6)$$

以下、単位層間変位時と同様に最小2乗法により部材のみの場合のFEM解析値を処理して係数 a 、 b を求めた。

3.2 剛域長さの比較

表-2は、前述の手法によりFEM解析結果に基づいて求めた剛域長さ(以下、FEM剛域と言う)及び既往の算定式(RC規準に掲げられている式)による剛域長さ(以下、RC剛域と言う)を示したものである。

(1) 材長と剛域長さの関係

材長を変化させたモデル(部材断面 60cm×60cm, 直交部材断面 40cm×80cm 及び部材断面 40cm×80cm, 直交部材断面 60cm×60cm)のFEM剛域について、材長と剛域長さの関係をみると、各条件(応力状態、部材断面、直交部材の有無)毎にそれらの差は0.0cm~0.7cmと極めて小さい。表には示していないがその他の断面のものについても同様であった。

したがって、材長の違いによる剛域長さの変化は大きくないので、以降では材長 420cm の場合についてのみに検討する。

(2) 応力状態と剛域長さの関係

直交部材が両側にあるモデルのFEM剛域について、単位の回転角を与えた場合と単位の層間変位を与えた場合の剛域長さを比較すると、両者の差は0.5cm~3.0cmの範囲にある。実際の建築物での応力状態は両者の中間的なものと考えられるので、剛域長さも両者の中間の値になると考えられる。

このように、応力状態の違いによる剛域長さの変化はそれほど大きくないので、以降では単位の層間変位を与えた場合についてのみに検討する。

(3) 部材断面の形状と剛域長さの関係

FEM剛域とRC剛域について、部材断面あるいは直交部材断面の縦横比(D_c/t_c)が違うモデルの剛域長さを比較すると、FEM剛域では、部材断面あるいは直交部材断面の縦横比が変化するとに伴い剛域長さも変化しているが、RC剛域では、剛域長さは一定となっている。例えば、部材断面が同一で直交部材断面の縦横比が異なるモデル(部材断面 20cm×80cm, 直交部材断面 40cm×45cm, 45cm×45cm)について見ると、縦横比の違いによりFEM剛域とRC剛域の剛域長さの差が10cm以上となるものも見られる。

したがって、RC剛域は部材のせいと直交部材のせいのみによって算出されているが、部材断面あるいは直交部材断面のせいのみではなく幅も剛域長さに影響する要因として考える必要があると言える。

(4) 直交部材の有無と剛域長さの関係

FEM剛域について、直交部材が両側にある場合と片側のみにある場合を比較すると、両者の差は2.5cm~9.8cmとなり、直交部材断面の違いにより両者の関係が異なることがわかる。これに対して、RC剛域では、直交部材が両側、片側に拘らず剛域長さは一定となる。FEM剛域とRC剛域を比較すると、直交部材が片側のみにある場合のRC剛域は、FEM剛域より20cm近く大きくなるもの(部

表-2 剛域長さ

部材断面 t _c ×D _c [cm×cm]	直交部材 断面 t _b ×D _b [cm×cm]	材長 [cm]	剛域長さ[cm]					RC 規準
			FEM					
			(a) 両側		(b) 片側			
			回転角	層間 変位	提案	層間 変位	提案	
60×60	40×80	240	18.9	21.0	20.5	13.4	13.4	25.0
		300	18.9	20.8	20.5	13.4	13.4	25.0
		360	18.9	20.6	20.5	13.4	13.4	25.0
		420	18.9	20.5	20.5	13.3	13.4	25.0
40×80	60×60	310	15.6	17.1	16.6	12.5	12.3	10.0
		420	15.6	16.8	16.6	12.5	12.3	10.0
		600	15.5	16.6	16.6	12.4	12.3	10.0
		780	15.5	16.5	16.6	12.4	12.3	10.0
		870	15.6	16.4	16.6	12.3	12.3	10.0
20×45	45×80	420	31.5	31.7	31.4	27.4	26.6	28.8
	50×80	420	31.5	31.7	31.9	27.5	27.4	28.8
20×60	45×80	420	29.5	30.0	29.0	25.4	23.7	25.0
20×80	*20×45	420	6.9	8.6	9.5	4.8	6.5	2.5
	*40×45	420	12.4	13.1	14.0	10.6	11.6	2.5
	*45×45	420	12.7	13.4	14.6	10.9	12.3	2.5
	35×60	420	17.7	18.7	17.7	15.0	13.6	10.0
	45×60	420	18.8	19.7	19.4	16.3	15.7	10.0
	50×60	420	18.9	19.7	20.1	16.4	16.6	10.0
30×60	45×45	420	11.9	12.7	12.5	9.4	9.2	7.5
	60×60	420	18.9	19.6	19.7	15.5	15.5	15.0
	80×80	420	28.5	29.0	30.0	24.2	25.1	25.0
30×80	*45×45	420	10.5	11.5	11.7	8.5	8.7	2.5
	60×60	420	17.0	18.0	18.6	14.2	14.7	10.0
	80×80	420	26.2	27.2	28.4	22.4	23.5	20.0
40×45	20×80	420	20.7	21.7	21.9	14.9	14.5	28.8
	50×80	420	28.2	28.8	28.1	22.4	22.0	28.8
	60×80	420	29.1	29.6	29.2	23.8	23.5	28.8
	70×80	420	29.4	29.8	30.0	24.4	24.7	28.8
	80×80	420	29.6	30.0	30.8	24.8	25.7	28.8
40×60	45×45	420	10.1	11.2	10.9	7.3	7.5	7.5
	60×60	420	17.7	18.6	18.0	13.9	13.4	15.0
	50×80	420	25.2	26.2	25.1	19.5	18.6	25.0
	60×80	420	26.4	27.2	26.4	21.2	20.2	25.0
	70×80	420	27.1	27.8	27.4	22.1	21.5	25.0
	80×80	420	27.2	27.9	28.3	22.4	22.7	25.0
40×80	*45×45	420	8.4	9.8	10.0	6.3	6.9	2.5
	80×80	420	24.5	25.7	26.3	20.2	20.7	20.0
	30×60	420	9.7	11.7	11.8	6.8	7.2	10.0
	40×60	420	11.3	13.5	13.8	7.9	9.2	10.0
	60×60	420	15.6	16.8	16.6	12.5	12.3	10.0
	30×100	420	23.4	25.9	25.8	16.7	17.0	30.0
	40×100	420	26.1	28.6	28.5	18.8	20.0	30.0
	50×100	420	29.1	31.1	30.6	22.5	22.5	30.0
	60×100	420	32.1	33.4	32.3	25.8	24.5	30.0
	70×100	420	32.7	34.0	33.6	26.9	26.2	30.0
	80×100	420	33.4	34.6	34.7	27.9	27.7	30.0
90×100	420	33.7	34.8	35.7	28.3	29.0	30.0	
100×100	420	33.8	34.9	36.5	28.6	30.1	30.0	
40×100	50×100	420	27.0	29.5	28.2	21.1	20.2	25.0
	70×100	420	30.3	32.2	31.6	25.2	24.3	25.0
	90×100	420	31.3	32.9	34.0	26.6	27.4	25.0
45×45	30×60	420	14.5	15.5	15.4	10.1	10.0	18.8
	30×80	420	22.9	23.8	24.0	16.8	16.8	28.8
	40×60	420	16.5	17.3	17.0	11.6	11.8	18.8
	40×80	420	25.2	26.0	25.9	18.7	19.2	28.8
45×60	30×60	420	11.7	13.1	12.9	8.0	8.0	15.0
	30×80	420	19.0	20.5	20.5	13.4	13.4	25.0
	40×60	420	13.6	15.0	14.8	9.3	9.8	15.0
	40×80	420	21.4	22.9	22.6	15.3	15.7	25.0
60×45	30×45	420	7.1	8.2	8.4	4.7	4.8	11.3
	40×45	420	8.7	9.7	9.7	5.8	6.0	11.3
	60×45	420	10.8	11.7	11.6	7.3	7.9	11.3
	30×60	420	12.4	13.4	13.7	8.4	8.4	18.8
	40×60	420	14.4	15.3	15.4	9.9	10.0	18.8
	60×60	420	17.2	17.8	17.6	12.0	12.5	18.8
60×60	30×60	420	9.8	11.2	11.2	6.7	6.4	15.0
	30×80	420	16.4	18.0	18.3	11.4	11.3	25.0
	*30×100	420	—	25.8	26.4	17.3	17.2	35.0
	40×60	420	11.6	13.1	12.9	8.0	8.0	15.0
	40×80	420	18.9	20.5	20.5	13.3	13.4	25.0
	40×100	420	—	28.7	29.0	19.8	20.0	35.0
80×80	30×60	420	5.8	7.5	7.5	4.1	3.8	10.0
	30×80	420	10.3	12.4	12.7	7.1	6.8	20.0
	30×100	420	15.9	18.3	19.2	11.0	10.9	30.0
	40×60	420	7.2	9.1	9.1	5.1	5.0	10.0
	40×80	420	12.4	14.7	14.9	8.6	8.6	20.0
	40×100	420	18.8	21.3	21.9	13.2	13.2	30.0

* 算定式の誘導には使用せず

材断面 80cm×80cm, 直交部材断面 30cm×100cm) も見られる。

以上のことより、RC剛域は部材の接続状態を考慮せずに算出されているが、直交部材の接続状態により剛域長さ算出方法を変える必要があると考えられる。

以上のように、既往の剛域算定式では部材断面の形状、直交部材の有無によって精度に変動が見られ、必ずしも十分とは言えない。

3.3 剛域算定式の誘導

前述のFEM解析結果を整理して剛域算定式を導く。前述のように材長及び応力状態の剛域長さ及び影響は小さいので、ここでは剛域長さ l_s' に影響する要因から除き、部材断面(部材幅 t_c 、部材せい D_c 、直交部材幅 t_b 及び直交部材せい D_b)及び直交部材の有無を考慮して剛域長さ算定式を導くことにする。この場合材長は420cm、応力状態はせん断力及びモーメントが作用した場合(単位層間変位時)の値を用いることにする。また、剛域算定式に汎用性を与えるため、(7)式のように剛域長さ及び部材寸法を無次元化した変数を用いることにする。

$$l_s' = \frac{2l_s}{D_b}, \quad t_{bc} = \frac{t_b}{t_c}, \quad D_{bc} = \frac{D_b}{D_c}, \quad D_{tc} = \frac{t_c}{D_c} \quad \dots (7)$$

図-4は縦軸に l_s' の値、横軸に t_{bc} の値を取り、 D_{bc} の値をパラメーターとしてプロットした一例である。同図には、 D_{tc} の値が異なるものもプロットした。同図によると、他の値が同一なら D_{tc} の値が変わっても l_s' と D_{bc} の関係は差程変わらない。そこで、 D_{tc} の値も剛域長さの影響要因から除外し、剛域推定式を導くことにする。

D_{bc} 毎に l_s' と t_{bc} の関係を(8)式で近似させる。この式は t_b が薄くなれば l_s' は0に近づき、逆に厚くなれば1に近づくと考えたものである。

$$l_s' = 1 - \frac{1}{1 + a t_{bc}^b} \quad \dots (8)$$

FEM解析結果より D_{bc} の値毎に(8)式の係数 a 、 b を最小2乗法で求めた。図-5は縦軸に a 、 b の値を取り、横軸に D_{bc} の値を取ったものである。 a 及び b と D_{bc} の関係を2次式で近似させ、(9)、(10)式を得た。

両側に直交部材がある場合

$$\left. \begin{aligned} a &= 0.554 + 0.075D_{bc} + 0.421D_{bc}^2 \\ b &= 1.572 - 1.078D_{bc} + 0.323D_{bc}^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots (9)$$

片側のみに直交部材がある場合

$$\left. \begin{aligned} a &= 0.402 - 0.157D_{bc} + 0.283D_{bc}^2 \\ b &= 1.620 - 0.892D_{bc} + 0.220D_{bc}^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots (10)$$

FEM剛域と(8)～(10)式の提案式を用いて算定した剛域長さ(以下、提案剛域と言う)を表-2の提案式の欄に掲げた。表には提案式を導くのに用いなかったモデル(表中*印のもの)も掲げた。因みに、FEM剛域との差について全モデルの平均値及び標準偏差を求めると、それらの値は提案剛域両側で-0.04 cm及び0.56 cm、同片側で-0.06 cm及び0.64 cm、RC剛域(両側との比較で)1.18 cm及び5.34 cm、同(片側との比較で)-4.40 cm及び6.46 cmとなり、提案式はRC剛域と比べてFEM剛域との近似度は良く、推定式としては十分な精度であると言える。また、本論文での解析モデルは通常用いられている部材断面の範囲を包含しており、実用式として十分対応し得ると考えられる。

図-4 l'_s と t_{bc} の関係の一例 図-5 a, b と D_{bc} の関係

4. 架構モデルへの適用

4.1 解析モデル及び解析方法

解析モデルは3スパン9層の平面架構で、図-6にその3階部分までを示す。各部材の諸元は、スパン長600cm、階高360cm、柱断面55cm×55cm、梁断面36cm×75cm（基礎梁断面36cm×80cm）である。

平面架構の解析は二次元有限要素法及び曲げ・せん断・部材伸縮及び材端剛域を考慮した線材モデルによる剛性法（以下、単に剛性法と言う）で行った。有限要素法解析では、要素内でひずみが線形に変化する自由度8の長方形要素を用い、表-3に示すような要素分割とした。剛性法では、材端にRC剛域または提案剛域を取り入れた。

解析に際して、1階柱脚を固定とし、各階に単位の水平力 $P=1$ を作用させ、ヤング係数 E を単位とし、コンクリートのポアソン数を $1/6$ とした。なお、精解値として取り扱う二次元有限要素法解析値（以下、FEM値と言う）の精度については拙論¹⁾で検討している。

4.2 有限要素法解析値と剛性法解析値との比較

表-4は層間変位及び柱端モーメントについて、FEM値とそれに対する剛性法解析値の比を示したものである。

(1) 層間変位について

層間変位について見ると、RC剛域を取り入れた場合には階位置によって5%程度比の値が変動しているが、提案剛域を取り入れた

図-6 平面架構の解析モデル（3層部分）

表-3 要素分割状態（分割長さ[cm]×分割数(○内の数字)）

方向	部材	寸法[cm]	要素分割
水平	柱幅	55.0	9.00×①, 9.25×④, 9.00×①
	スパン内法	545.0	18.00×⑩, 18.50×⑩, 18.00×⑩
	基礎梁せい	40.0	10.00×④
鉛直	1～9階梁せい	75.0	9.35×②, 9.40×④, 9.35×②
	1階柱内法	282.5	14.00×⑤, 14.25×⑩, 14.00×⑤
	2～9階柱内法	285.0	14.00×⑤, 14.50×⑩, 14.00×⑤

表-4 平面架構の解析結果

		階位置	FEM [P/E・cm]	剛性法 RC剛域	FEM 提案剛域
層間変位		9階	3.90	1.01	1.03
		8階	6.26	1.03	1.04
		7階	8.69	1.04	1.05
		6階	11.10	1.04	1.05
		5階	13.47	1.05	1.06
		4階	15.79	1.05	1.06
		3階	17.99	1.05	1.06
		2階	19.52	1.05	1.06
		1階	14.55	1.00	1.06
柱位置	材端	FEM [P・cm]	剛性法 RC剛域	FEM 提案剛域	
柱端モーメント	外柱	9階柱頭	30.0	1.04	1.02
		柱脚	13.6	0.87	1.02
		8階柱頭	70.3	1.04	1.01
		柱脚	47.5	0.97	1.00
		7階柱頭	102.4	1.02	1.00
		柱脚	80.0	0.98	1.00
		6階柱頭	135.7	1.01	1.00
		柱脚	112.9	0.99	1.00
		5階柱頭	169.0	1.01	0.99
		柱脚	146.0	1.00	1.00
		4階柱頭	202.7	1.00	0.99
		柱脚	179.5	1.00	1.00
		3階柱頭	236.6	1.00	0.99
		柱脚	214.8	1.01	1.01
		2階柱頭	265.0	0.99	0.99
		柱脚	255.1	1.01	1.01
		1階柱頭	247.2	0.96	0.97
		柱脚	422.0	1.08	1.02
	内柱	9階柱頭	77.4	1.02	0.99
		柱脚	59.0	0.99	0.99
		8階柱頭	129.6	1.00	1.00
		柱脚	112.6	0.99	1.00
		7階柱頭	187.5	1.00	1.00
		柱脚	170.1	0.99	1.00
		6階柱頭	244.2	1.00	1.00
		柱脚	227.3	0.99	1.00
		5階柱頭	300.7	1.00	1.00
		柱脚	284.3	1.00	1.00
		4階柱頭	356.8	1.00	1.00
		柱脚	341.1	1.00	1.00
		3階柱頭	411.3	1.00	1.00
		柱脚	397.4	1.00	1.00
		2階柱頭	458.4	1.00	1.00
		柱脚	461.6	1.00	1.00
		1階柱頭	402.8	0.95	1.00
		柱脚	548.0	0.99	1.00
		梁位置	材端	FEM [P・cm]	剛性法 RC剛域
梁端モーメント	外梁	9階左端	30.0	1.04	1.02
		右端	17.7	1.08	1.07
		8階左端	84.0	1.01	1.01
		右端	72.0	1.02	1.02
		7階左端	149.9	1.00	1.00
		右端	130.9	1.01	1.01
		6階左端	215.6	1.00	1.00
		右端	190.9	1.00	1.01
		5階左端	281.9	1.00	1.00
		右端	251.2	1.00	1.01
		4階左端	348.7	1.00	1.00
		右端	312.4	1.00	1.00
		3階左端	416.0	1.00	1.00
		右端	374.2	1.00	1.00
	内梁	2階左端	479.8	1.00	0.99
		右端	433.5	1.00	1.00
		1階左端	502.3	0.99	0.99
		右端	449.5	0.98	1.00
		9階左端	59.6	1.00	0.97
		8階左端	116.6	0.99	0.99
		7階左端	169.2	0.99	0.99
		6階左端	223.5	0.99	0.99
		5階左端	276.7	1.00	1.00
		4階左端	328.7	1.00	1.00
		3階左端	378.2	1.00	1.00
		2階左端	422.2	1.00	1.00
		1階左端	414.9	0.98	1.00

場合には比の値の変動が小さくなっている。なお、拙論¹⁾で弾性論との比較あるいは要素分割数を変えて検討した結果によれば、本論で用いた要素分割で得られるFEM解析値の変位は正解より数%小さく算出されていると考えられる。このことを考慮すると、提案剛域を用いて得られた変位は極めて正解に近いものであると言えよう。

(2) 柱端モーメントについて

柱端モーメントについて見ると、RC剛域を取り入れた場合には外柱の最上階柱脚でFEM値より小さく、同最下階柱脚で大きくなっているが、提案剛域を取り入れた場合にはこれらの材端においてもFEM値に近似した値となっており、提案剛域による改善が認められる。

(3) 梁端モーメントについて

梁端モーメントについて見ると、いずれの剛域を取り入れた場合にも外梁の最上階右端でFEM値より大きくなっているが、その他はいずれもFEM値に概ね近似した値となっている。

以上のことから、本論で提案する剛域長さ推定式は実用に十分耐え得るものと考えられる。

5. まとめ

本論では、まず、断面寸法を種々に変化させた、柱梁からなる部材模型（通常存在すると考えられる範囲のもの）を三次元有限要素法解析し、その結果に基づいて剛域長さを求めた。更に、部材せい D_c 、部材幅 t_c 、直交部材せい D_b 、直交部材幅 t_b を変数として、それらの剛域長さを統計的に処理し、剛域算定式を提示した。

次に、その剛域を適用した平面架構モデルの線材置換による解析値と同モデルの二次元有限要素法解析値の比較により、剛域算定式の有用性について検討した。それらの結果をまとめると以下の通りである。

(1) 既往の剛域長さ算定式（RC剛域）では、 D_c 、 D_b のみによって剛域長さを求めるとしているが、それらの他に t_c 、 t_b も剛域長さに大きく影響する。

(2) RC剛域では直交部材が部材の両側にあっても、片側にあっても同値となるが、直交部材が両側にあるか、片側のみかによって剛域長さは大きく変わる。

(3) 剛域長さに及ぼす応力分布の影響あるいは材長の影響は小さい。

(4) 本論の提案式による剛域を取り入れた平面架構モデルの解析結果は、RC剛域を取り入れたそれよりも、二次元有限要素法解析結果に対応し、本論の提案式が十分有用であると確認された。

参考文献

- 1) 北川淳，大築和夫，鈴木邦康：たわみ角法及び剛性法による水平力を受ける鉄筋コンクリート平面ラーメン解析の精度について，日本建築学会構造系論文集，No.524，pp.73～80，1999.10
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算標準・同解説，1999
- 3) 奥田勇：架構材の定数について，東京大学卒業論文，1927
- 4) 武藤清：耐震設計シリーズⅠ 耐震設計法，丸善
- 5) 鈴木邦康，大築和夫，塚野憲：水平力を受けるRC部材の剛域についての検討（その1 有限要素法解析に基づく剛域について），日本建築学会大会学術講演梗概集C2，pp.831～832，1995.8
- 6) 大築和夫，鈴木邦康，塚野由貴子：有限要素法解析による水平力を受けるRC部材の剛域について，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.68，pp.193～196，1995.3

[2000年4月20日原稿受理 2000年7月26日採用決定]