

ラーメン構造の弾塑性耐震解析に関する研究

The study of elastio-plastic seismic analysis for rigid-frame structures

陳 珉* 青木 徹彦**
Chen min Aoki Tetsuhiko

Abstract Elastic and elastio-plastic earthquake-resistant analysis of frame construction is mainly studied in this paper. In elastic stage, response and vibrated characteristics of symmetrical and unsymmetrical structure are investigated by comparing the results of plane and space analysis. The effect of approaching angle of seismic wave to vibrated characteristics of structure under different column/beam rate are discussed. In elastio-plastic stage, four kinds of plastic mode with different plastic positions are established, the response displacement and hysteresis curves are compared at different plastic modes, the plastic extension at specified and unspecified plastic position are compared too, the effect of plastic modes to the analysis results is discussed finally.

1. はじめに

構造物の耐震解析では一般に一質点系モデルや平面モデルに単純化されることが多く、3次元解析はまた十分行われていない。しかし、現実の構造物は立体であり、特に、高架高速道路のランプなどは平面構造に分解することが困難であり、また剛心と重心のずれも大きい。したがって、その複雑な振動特性を忠実に把握するために、3次元的に解析が必要となる。

また、骨組の弾塑性状態をより正しく把握するためには、部材内の損傷の広がり考えたモデル化する必要がある。弾塑性解析には、従来から材端弾塑性ばねモデル、塑性ヒンジモデルなどが用いられているが、それは分布する損傷を特定応力状態に対して評価し、部材端に集中させる理想化手法である。より正確な挙動を把握するためには、損傷の広がりを表現できるモデルを用いる必要があると考えられる。

そこで、本研究では、3次元振動解析プログラムを開発し、また塑性域まで考慮した振動挙動をより正しく表現できる新たな弾塑性部材モデルを作り、弾塑性解析を行う。

弾性解析では、平面解析の結果と比較検討し、いくつか

の地震波を受ける立体ラーメン構造物の応答性状および振動特性を考察する。また弾塑性解析では、塑性化モードの違いが応答及び履歴特性などに及ぼす影響などを解明する。

2. 弾性解析

2.1 解析方法

有限要素法とニューマークの β 法を用いる直接数値積分法を併用する弾塑性有限変位時刻歴応答解析法を開発する。解析プログラムについて、入力地震波の多方向性入力を考え、水平一方向、水平二方向また水平方向および鉛直方向の三方向入力地震波を受ける構造の振動応答解析を行う。また、入力角度の違いがもたらす応答の違いを検討する。

解析の際、質量マトリックスでは集中質量を用い、減衰マトリックスでは剛性比例型減衰を用いる。

2.2 解析内容

(1) プログラムの妥当性

はじめにプログラムの妥当性を検討するため、質量一バネモデルに対する微分方程式により求めた解を厳密解とし、立体解析、平面解析の結果を比較した。

* 愛知工業大学 土木工学科 (豊田市)

** 愛知工業大学 土木工学科 (豊田市)

表 1 計算結果比較

	最大変位 (cm)	誤差 (%)
立体解析	0.2218	(0.2)
平面解析	0.2218	(0.2)
厳密解	0.2223	(-)
	最大速度 (cm/s)	誤差 (%)
立体解析	0.8681	(0.3)
平面解析	0.8681	(0.3)
厳密解	0.8711	(-)
	最大加速度 (cm/s ²)	誤差 (%)
立体解析	3.870	(0.5)
平面解析	3.8685	(0.6)
厳密解	3.8903	(-)

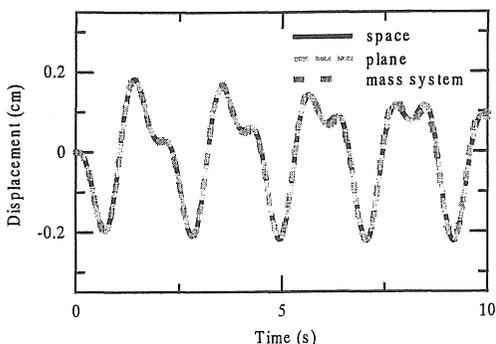


図 1 水平応答変位比較

計算結果では、立体解析、平面解析により計算された最大応答変位、最大応答速度、最大応答加速度が厳密解とはほぼ一致した、応答波形もほぼ一致と分かってきた。(表 1、図 1 参照)

(2) 振動応答解析モデル

建物にねじれ変形が生じる原因は建物の各階の重心と剛心の偏心による。偏心の種類を要因別に分けると次のようになる。

- 建物の偏心
 - 質量偏心・塔屋の偏在、セットバック、等
 - 剛性偏心・耐震壁の偏在、等
 - 耐力偏心・耐力のアンバランス

上記のうち、本研究では質量偏心と剛性偏心の問題を対象とする。

平面分け解析と立体解析との差を比べながら、形状対称と形状非対称の 2 ケースに大別して比較検討した。形状対称の構造では、材料特性対称と非対称 (剛性偏心) の二つ場合について解析する。形状非対称の構造では、平面不整形と立面不整形 (質量偏心) の二つ場合について解析を行う。

(3) 解析結果

① 形状対称、材料特性対称構造

構造に鉛直荷重をかけ、水平二方向地震波を作用させると、立体解析により計算された水平二方向および鉛直方向での応答変位波形が平面分け解析により求めた結果にほとんど一致し、最大誤差は 0.1% 以下である。

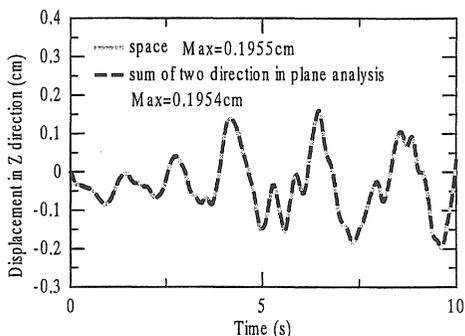
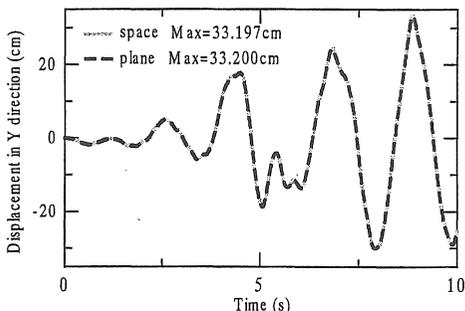
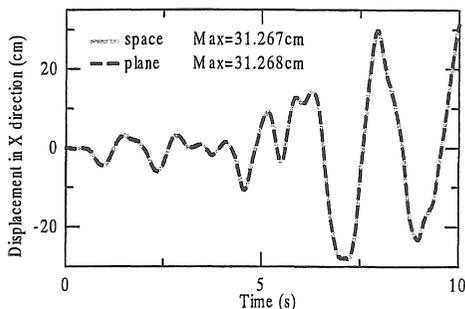


図 2 双向地震波による応答変位

② 形状対称、材料特性非対称構造

図 3 のような剛性非対称構造に対して、3 種地盤、2 レベルの各地震波を入力した構造の振動性状を調べた。平面解析による高剛性ラーメン、低剛性ラーメンの応答変位は立体解析の結果との誤差が見られた。低剛性ラーメンは高剛性ラーメンより大きい誤差が生じている。それは低剛性

ラーメンではねじりが生じやすいと考えられる。

は高さが異なった非対称な構造で、X 軸方向に偏心を有する。

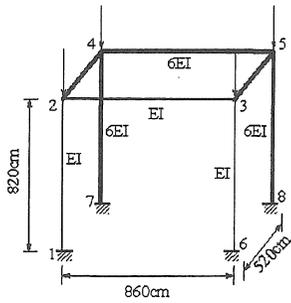


図3 剛性非対称構造

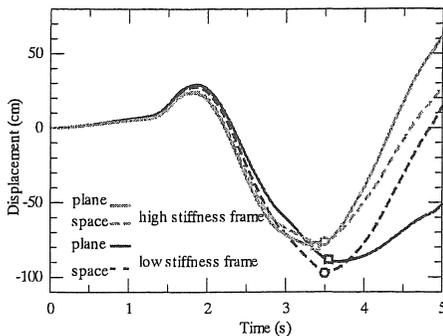


図4 Jiban1L2による変位比較図

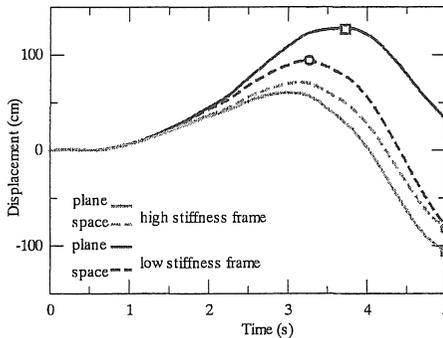


図5 Jiban212による変位比較図

また、高剛性ラーメンでは平面解析から計算された結果は安全側にあるが、jiban212、jiban311の以外の地震波を受けた場合、低剛性ラーメンでは危険側の結果をもたらすことになった。

③ 形状非対称構造

形状非対称のラーメン構造として、図6の(1)、(2)に示すものを考える。図(1)はY軸方向に偏心があり、図(2)

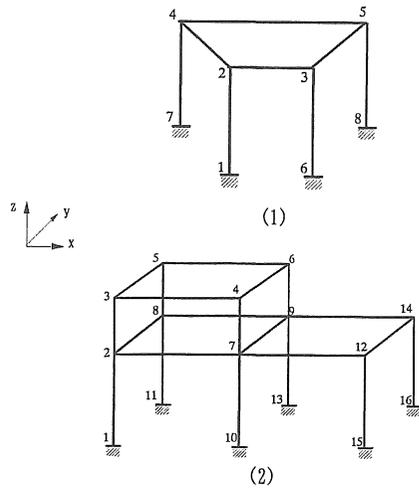


図6 形状非対称ラーメン

二つ構造に二方向入力地震波をかけ、平面および立体解析を行ったところ、Y軸方向に偏心がある構造[図(1)]では、Y軸方向での平面と立体解析の間の平均応答誤差が大きい。平均応答誤差とは各節点における各方向の応答誤差の平均値という。また、X軸方向に偏心がある構造[図(2)]では、X軸方向での平面と立体解析の間の平均応答誤差はY軸方向の誤差より大きく表れている。

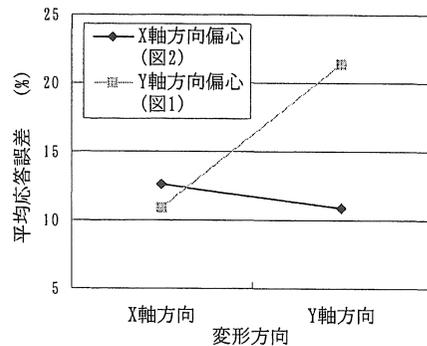


図7 変形方向の平均応答誤差

また、図(2)の構造では偏心があるため、その方向のみ入力地震波にかけると、外力の作用方向は偏心方向と平行するから、回転を生じなかった。したがって、このような場合、偏心が存在しても平面解析と立体解析とはほぼ一致した結果が得られた。水平方向の結果を図8に示す、鉛直方向でもこの傾向があった。

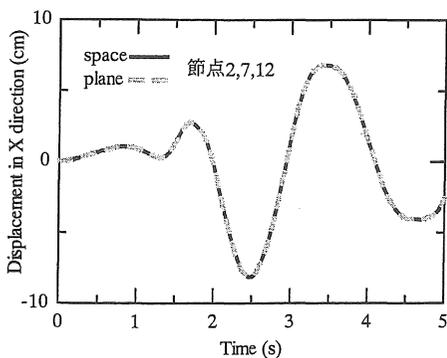


図 8 変位比較

④ 入力角度

地震波の入力方向によってラーメン構造がどのような挙動を示すかを検討した。入力方向は面内方向から面外方向に向かって $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の 5 ケースについて実施した。

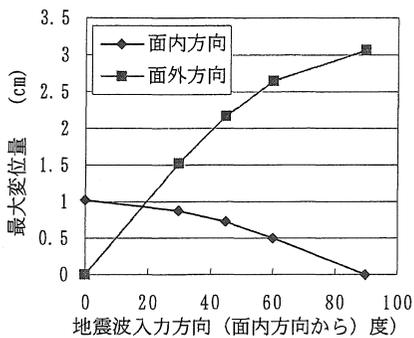


図 9 入力角度の影響 (柱高/梁長=0.5)

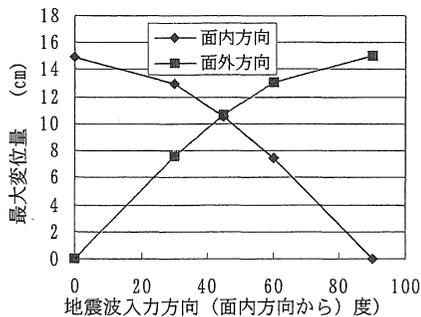
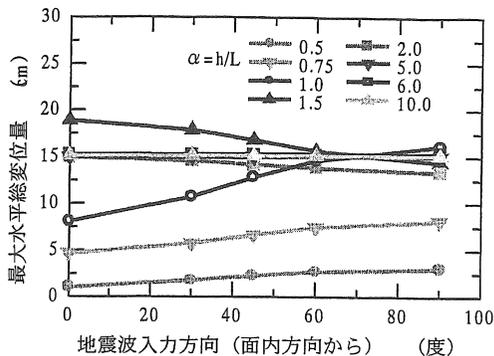


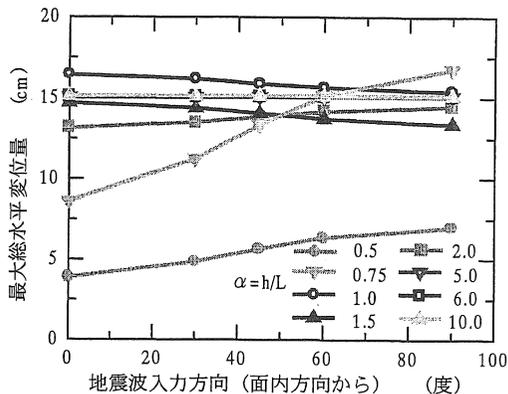
図 10 入力角度の影響 (柱高/梁長=5 以上)

地震波の入力角度を変化させたとき、ラーメンの柱高 h と梁長 l の比 $\alpha = h/l$ を変えた場合、いくつかのラーメン構造を調べた結果、この比の値が 0.5 ぐらいのとき、最大総水平変位量はほぼ入力角度の増加につれて増加する傾

向があった(図 9, 11 参照)。また、比の値が 5 以上になると、入力角度に関わらず最大総水平変位量はほぼ一致し、比の値にも関わらず最大値はほぼ等しい(図 10, 11 参照)。他の比の値では、一定の傾向が認められない。



ラーメン 1



ラーメン 2

図 11 入力方向における総変位

3. 弾塑性解析

3.1 解析方法

弾塑性解析を行う場合、ラーメン構造モデルを図 12 のように各部材を 7~10 個の要素に分割したものをを用いる。

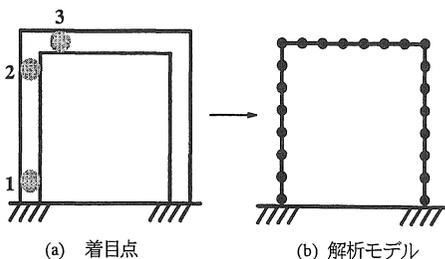


図 12

解析モデルでは、ラーメン骨組を構成する柱、はりなど各部材をそれぞれのモーメント-回転角あるいはせん断力-変形の弾塑性復元力特性(履歴モデル)を考慮しながら応答解析を行う。これは、骨組の地震による損傷の過程を正しくとらえるために必要なことである。本研究では、部材の曲げモーメント-曲率関係を図13に示すバイリニア型を設定し、硬化係数を0.01と仮定する。すなわち、部材要素剛性マトリックスで、降伏前の曲げ剛性と軸剛性をEI, EAと設定すれば、降伏後 $EI' = 0.01EI$ 、 $EA' = 0.01EA$ になる。

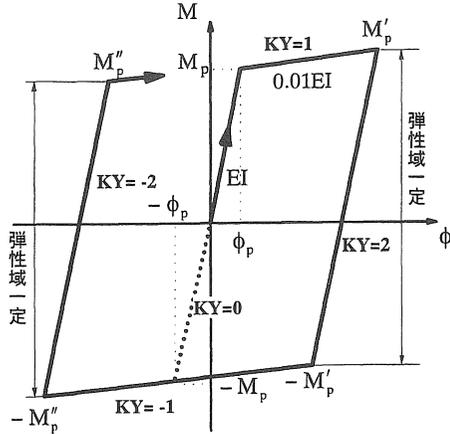


図13 曲げモーメント-曲率関係

部材の降伏判断は各部材の中間断面の曲げモーメント(両端曲げモーメントの平均値 \bar{M})により判断する(図14)。中間断面で生じる曲げモーメント \bar{M} が全塑性曲げモーメント M_p に達した時に降伏と判定する。判定式は式(1)のようになる。

$$\bar{M} = \frac{M_A + M_B}{2} > M_p \quad (1)$$

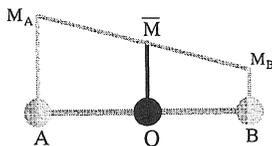


図14 要素の平均曲げモーメント

3.2 解析と考察

解析においては、若林博士の行った実大鉄骨ラーメン骨組のデータ²⁾を用いて解析を行う。鉄骨ラーメン骨組の形状、諸寸法、材料の諸定数、荷重を図15、表2に示す。

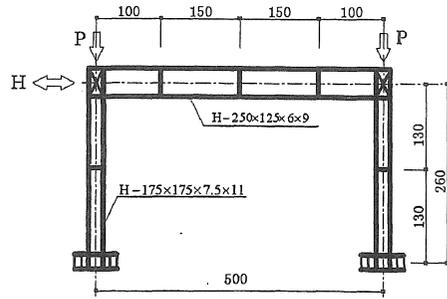


図15 鉄骨ラーメンの形状、諸寸法

表2 材料の諸定数

		柱	梁
断面積 (cm ²)	A	51.21	37.66
断面2次モーメント (cm ⁴)	I	2880	4080
断面係数 (cm ³)	Z	330	324
塑性断面係数 (cm ³)	Z _p	366	370
降伏応力度 (t/cm ²)	σ _y	2.68	2.86
降伏軸力 (t)	N _p	136.2	109.6
全塑性曲げモーメント (t·cm)	M _p	980.9	1058.2

3.2.1 塑性化モードの検討

ここでは、塑性化箇所の設定の違いが応答に及ぼす影響を検討する。塑性化箇所の設定について、表3に示すような4パターンを考え、塑性化モード1-3は塑性化箇所を特定したモードであり、塑性化モード4は塑性化箇所を特定しないモードである。

表3 塑性化モードの設定

モード	塑性化箇所
1	柱基部の一要素のみ塑性化する
2	柱基部と柱頂部の各一要素を塑性化する
3	柱基部、頂部と梁端部の各一要素が塑性化する
4	塑性化箇所を特定しない

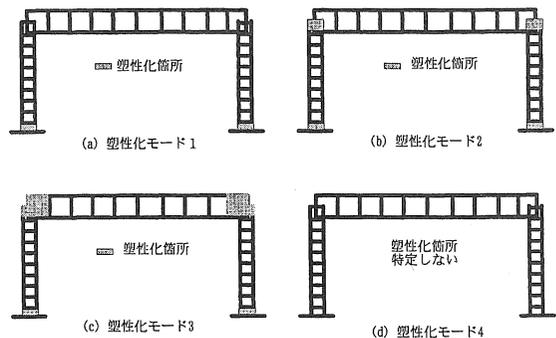
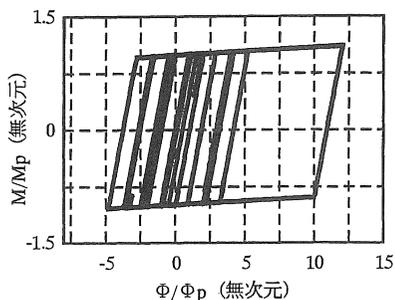


図16 塑性化箇所の設定

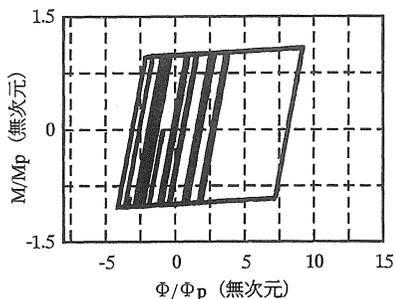
塑性化箇所は、柱基部では最下部の一要素、隅角部では剛域を考慮しない、柱、梁の端部の各一要素に設定することにする。(図 16 参照)

(1) 曲げモーメント-曲率曲線

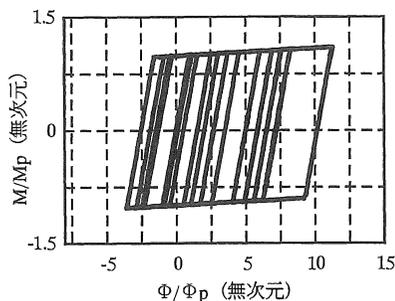
図 17(a)-(d) に示すのはそれぞれ塑性化モード 1~4 の柱基部の曲げモーメント-曲率の履歴曲線である。基準となる塑性域を特定しないモード 4 [図 (d)] と 1~3 のモードを比較すると、最も生じやすいと考えられる柱上下端ヒンジモード 2 [図 (b)] が予想に反して、基準 [図 (d)] との差が大きく、柱基部に加えて柱頂部、両端部とも塑性化する塑性化モード 3 がほぼ一致した。柱頂部、梁端部でもこの傾向が認められる。



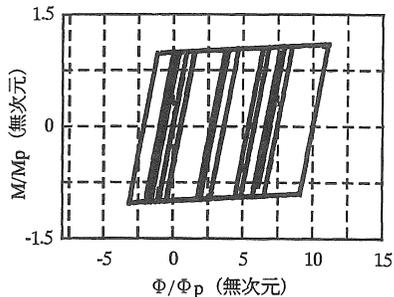
(a) 塑性化モード 1



(b) 塑性化モード 2



(c) 塑性化モード 3



(d) 塑性化モード 4

図 17 柱基部(要素 1)の履歴曲線

(2) 応答変位

図 18 に示すのはモード 1 とモード 3 における柱頂部の応答水平変位の比較である。同図より、最大応答変位には大きな差が認められないものの、残留変位には大きな差を生じていることが分かった。他のモードでもこの傾向があったが、モード 3 とモード 4 の場合では、最大値と残留値とは極めて近い結果が得られた(図 19 参照)。また、弾性解析の結果と比較すると、弾塑性解析を行ったいずれのモードでも、降伏後履歴減衰により振幅が小さくなるため、最大応答変位は弾性応答よりやや小さいと考えられる。

(図 20 参照)

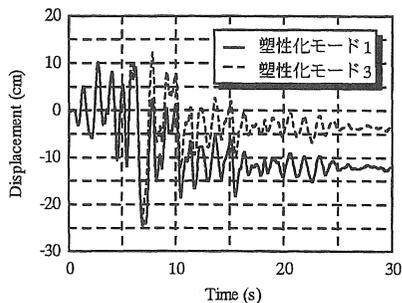


図 18 各塑性化モードによる柱頂部水平変位

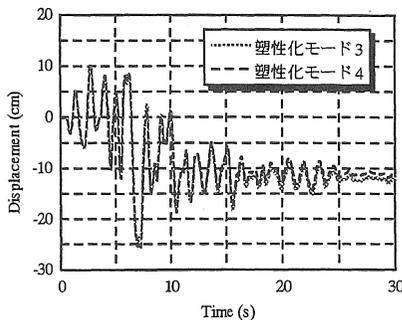


図 19 モード 3、4 の柱頂部水平変位

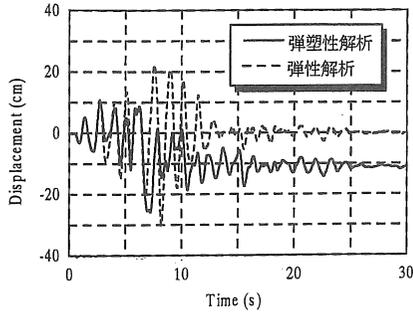


図 20 弾性解析と弾塑性解析の応答変位

(3) 塑性域

履歴曲線を調べると、塑性化箇所を特定した場合には、特定した箇所のみ弾塑性履歴を表したが、履歴曲線と応答変位ではよく一致した塑性化モード 3 の塑性域と比べると、塑性化箇所を特定していないモード 4 の場合には、図 21 のように、柱基部 では塑性域が要素 3 あるいは要素 28 まで(基部から 3 番目のところ)進行し、柱と梁の隅角部では、塑性域が隅角部から各 2 個の要素まで進行した。

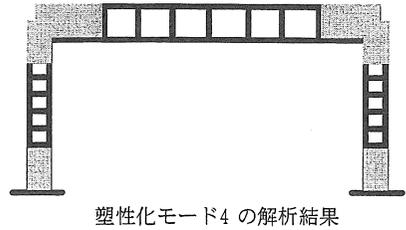
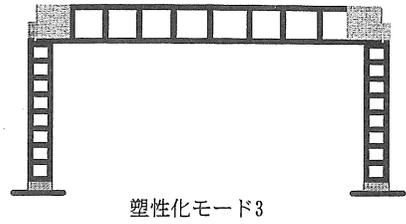
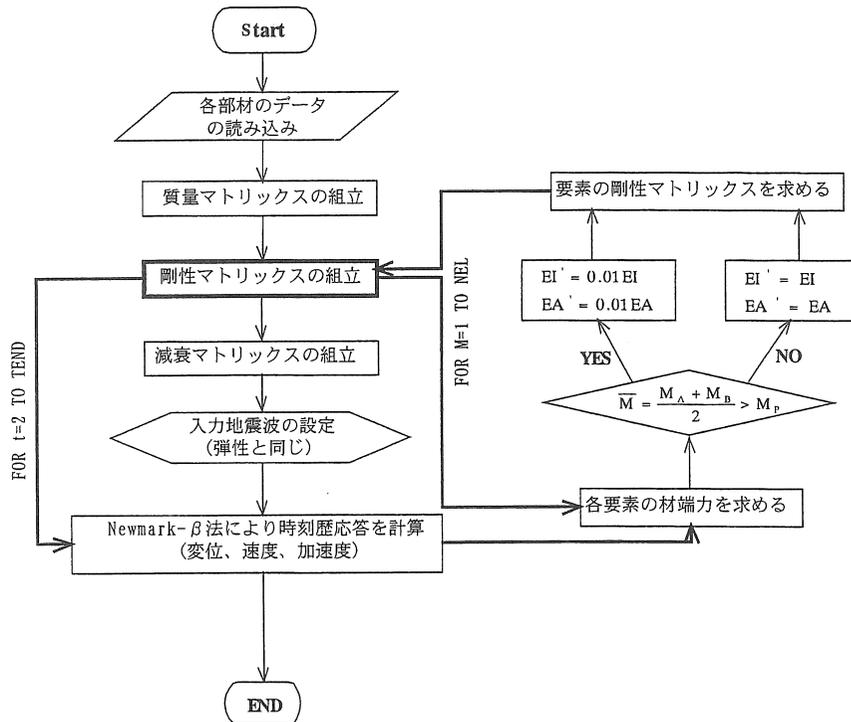


図 21 塑性域の広がり

4 弾塑性解析プログラム



フローチャート

本研究で開発した弾塑性振動解析プログラムについて、
上図のフローチャートに従って作成した。ここで主なサブ
ルーチンを簡単に紹介する。

```

TEND:   解析計算時間
NNP:    節点総数
NEL:    要素総数
INACC:  入力加速度
STIFF(): 全体剛性マトリックス
ESM():  要素剛性マトリックス
DE():   要素の全体座標系の応答変位増分
DE:     要素の平均曲げモーメント増分
KY():   履歴特性のステージ表示
SM():   降伏曲げモーメント
SF1():  時刻における平均曲げモーメント増分/SM()
AVM():  時刻における平均曲げモーメント/SM()
SMC():  初期 = -SM()/SM() = -1
SMT():  初期 = SM()/SM() = 1
DMR():  Δ M

*****NEWMARK1*****
SUB NEWMARK1
*****

-----
CALL SSTIFDATA
-----

DIM IAD AS ADATA
DIM DSA AS RDATA
DIM DFA AS FDATA

-----
CALL FILE(1)
-----

TEND = TEND * 100
FOR N = 0 TO TEND
  IAD.ACC = INACC(N)      ' 水平方向の地震波
  IAD.ACC1 = INACC1(N)   ' 鉛直方向の地震波
  PUT #1, , IAD
NEXT N
CLOSE #1

FOR M = 1 TO NEL
  YD(M) = SM(M) / YOUNG(M) / SECT(M) ' 降伏曲率
NEXT M

-----
CALL FILE(2)
-----

FOR J = 1 TO NNP
  K = 3 * (J - 1) + 1
  DSA.UDIS = DIS(K)
  DSA.VDIS = DIS(K + 1) ' 各方向の変位、速度
  DSA.RDIS = DIS(K + 2) ' 加速度の初期値をラン
  DSA.UVEL = VEL(K)     ' ダムファイルに落とす
  DSA.VVEL = VEL(K + 1)
  DSA.RVEL = VEL(K + 2)

  DSA.UACC = ACC(K)
  DSA.VACC = ACC(K + 1)
  DSA.RACC = ACC(K + 2)
  PUT #1, J, DSA
NEXT J
CLOSE #1

-----
CALL FILE(3)
-----

FOR M = 1 TO NEL
  DFA.MB = AVM(M)
  DFA.RD = (-SDE(M, 3) + SDE(M, 6)) / 2 / AL(M) / YD(M)
  PUT #1, M, DFA
NEXT M
CLOSE #1

FOR S = 2 TO TEND + 1
  CALL SSTIFDATA      ' 剛性マトリックスの組立
  CALL FORCEDATA(RMASS(), RM(), RRM(), S) ' 外力□
  CALL SMASSDATA(SMASS(), RMASS(), S) ' 質量□
  CALL SDAMPDATA(DAMP(), SDAMP(), S) ' 減衰□
  CALL SFORCEDATA(RRM(), SMASS(), SDAMP(), S)
  CALL NEWMARK2(S, SFORCE(), SSTIF(), 0)
  CALL EDISP(S)

  CLS
  LOCATE 11, 33: COLOR 5: PRINT "ただいま計算中":
  COLOR 7
  LOCATE 21, 34: COLOR 6: PRINT (S - 1) / 100; ; COLOR
  3: PRINT " 秒まで": COLOR 7
NEXT S

END8:
OPEN "A:¥DATA3¥TOTAL.DAT" FOR OUTPUT AS #1
PRINT #1, TEND, NEQ, NBAND, NNP, NEL, DT
CLOSE #1
END SUB

*****EDISP*****
SUB EDISP(S)
*****
DIM DD(6)
DIM DFA AS FDATA

FOR I = 1 TO NEQ
  FOR J = 1 TO NBAND
    STIFF(I, J) = 0
  NEXT J: NEXT I

FOR M = 1 TO NEL
  NI = NODI(M): NJ = NODJ(M)
  FOR J = 1 TO 3
    K = 3 * (NI - 1) + J
    DD(J) = RDIS(K)
  NEXT J

  FOR J = 1 TO 3
    K = 3 * (NJ - 1) + J
    DD(J + 3) = RDIS(K)
  
```

```

NEXT J
'-----
CALL DRCTM(M)      '方向余弦 T  の作成
'-----
FOR I = 1 TO 6      '全体座標系から要素
S1 = 0!             座標系へ変換
FOR J = 1 TO 6
    S1 = S1 + T(I, J) * DD(J)
NEXT J
DE(M, I) = S1
NEXT I

DE = (-DE(M, 3) + DE(M, 6)) / 2
'-----
IF KY(M) = 1 THEN
    IF DE < 0 THEN
        KY(M) = 2
    END IF
ELSEIF KY(M) = -1 THEN
    IF DE > 0 THEN
        KY(M) = -2
    END IF
END IF
'-----
CALL ELSTF(M, 4)
'-----
FOR I = 1 TO 6
    SDE(M, I) = SDE(M, I) + DE(M, I)
NEXT I

EI = YOUNG(M) * SECT(M)
IF KY(M) = 0 OR KY(M) = 2 OR KY(M) = -2 THEN
    SF1(M) = (-DE(M, 3) + DE(M, 6)) / 2 / AL(M) * EI / SM(M)
ELSE
    SF1(M) = (-DE(M, 3) + DE(M, 6)) / 2 / AL(M) * .01 *
    EI / SM(M)
END IF
AVM(M) = AVM(M) + SF1(M)
'-----
CALL JUDGE(M, NI, NJ)
'-----
---ASSMBLLAGE OF TOTAL STIFFNESS MARTRIX---
'-----
CALL ELSTF(M, 3)      '剛性マトリックスの再組立
'-----
FOR K = 1 TO 6
    I = LM(K)
    FOR L = 1 TO 6
        J = LM(L) - I + 1
        IF J > 0 THEN
            STIFF(I, J) = STIFF(I, J) + ESM(K, L)
        END IF
    NEXT L
NEXT K
NEXT M
CALL DAMPING(1)

CALL NEWMARK2(S, SFORCE(), SSTIF(), 1)
'-----
CALL FILE(3)
'-----
FOR M = 1 TO NEL
    J = (S - 1) * NEL + M
    DFA.MB = AVM(M)
    DFA.RD = (-SDE(M, 3) + SDE(M, 6)) / AL(M) / YD(M)
    PUT #1, J, DFA
NEXT M
CLOSE #1

FOR J = 1 TO NNP
    K = 3 * (J - 1) + 1      '時刻 n+1 の入力加速度 SRM()
    RM(K) = SRM(K)          を時刻 n の入力加速度 RM() に
    RM(K + 1) = SRM(K + 1)   変換
    RM(K + 2) = SRM(K + 2)
NEXT J

IF NPB <> 0 THEN
    FOR N = 1 TO NFB
        NP = (NPF(N) - 1) * 3      '時刻 n+1 の鉛直力 SP()
        FOR J = 1 TO 3            を時刻 n の鉛直力 P() に
            K = NP + J              変換
            P(K) = SP(K)
        NEXT J
    NEXT N
END IF
END SUB

*****JUDGE*****
SUB JUDGE(M, NI, NJ)
*****
IF KY(M) = 0 THEN
'-----
    IF AVM(M) > SMC(M) AND AVM(M) < SMT(M) THEN
        KY(M) = 0
    END IF
    IF AVM(M) > SMT(M) THEN
        KY(M) = 1
        AVM(M) = (AVM(M) - SMT(M)) * .01 + SMT(M)
        SMT(M) = AVM(M)
        SMC(M) = SMT(M) - 2
    END IF
    IF AVM(M) < SMC(M) THEN
        KY(M) = -1
        AVM(M) = (AVM(M) - SMC(M)) * .01 + SMC(M)
        SMC(M) = AVM(M)
        SMT(M) = SMC(M) + 2
    END IF
    EXIT SUB
END IF

IF KY(M) = 1 THEN
'-----
    IF AVM(M) > SMT(M) THEN

```

```

      KY(M) = 1
      SMT(M) = AVM(M)
      SMC(M) = SMT(M) - 2
      YTD(M) = FAI(M) / YD(M)
      EXIT SUB
END IF
END IF

IF KY(M) = -1 THEN
  IF AVM(M) < SMC(M) THEN
    KY(M) = -1
    SMC(M) = AVM(M)
    SMT(M) = SMC(M) + 2
    EXIT SUB
  END IF
END IF

IF KY(M) = 2 THEN
  IF AVM(M) > SMT(M) THEN
    DM = ((-REF(M, 3) + REF(M, 6)) / 2 / SM(M) - DMR(M))
    * .01
    AVM(M) = SMT(M) + DM
    KY(M) = 1
    SMT(M) = AVM(M)
    SMC(M) = SMT(M) - 2
  ELSEIF AVM(M) > SMC(M) AND AVM(M) < SMT(M) THEN
    KY(M) = 2
    DMR(M) = SMT(M) - AVM(M)
  ELSEIF AVM(M) < SMC(M) THEN
    KY(M) = -1
    AVM(M) = (AVM(M) - SMC(M)) * .01 + SMC(M)
    SMC(M) = AVM(M)
    SMT(M) = SMC(M) + 2
  END IF
END IF

IF KY(M) = -2 THEN
  IF AVM(M) < SMC(M) THEN
    DM = ((-REF(M, 3) + REF(M, 6)) / 2 / SM(M) - DMR(M))
    * .01
    AVM(M) = SMC(M) + DM
    KY(M) = -1
    SMC(M) = AVM(M)
    SMT(M) = SMC(M) + 2
  ELSEIF AVM(M) > SMC(M) AND AVM(M) < SMT(M) THEN
    KY(M) = -2
    DMR(M) = SMC(M) - AVM(M)
  ELSEIF AVM(M) > SMT(M) THEN
    KY(M) = 1
    AVM(M) = (AVM(M) - SMT(M)) * .01 + SMT(M)
    SMT(M) = AVM(M)
    SMC(M) = SMT(M) - 2
  END IF
END IF
END SUB

'*****NEWMARK2*****
SUB NEWMARK2 (S, SFORCE(), SSTIF(), P)
'*****
IF P = 0 THEN
  FOR I = 1 TO NEQ
    FOR J = 1 TO NBAND
      SUBSTIF(I, J) = SSTIF(I, J)
    NEXT J
  NEXT I

  CALL GAUEL(SUBSTIF(), SFORCE(), NEQ, NBAND)
  -----DISPLACEMENT-----
  FOR I = 1 TO NEQ
    RDIS(I) = SFORCE(I)
  NEXT I

  ELSEIF P = 1 THEN
    -----VELOCITY-----
    FOR I = 1 TO NEQ
      SVEL(I) = (1 / (2 * BETA * TCUT)) * RDIS(I) + (1 -
      1 / (2 * BETA)) * VEL(I) + TCUT * (1 - 1 / (4 * BETA))
      * ACC(I)
    NEXT I
    -----ACCELERATION-----
    FOR I = 1 TO NEQ
      SACC(I) = (1 / (BETA * TCUT * TCUT)) * RDIS(I) -
      1 / (BETA * TCUT) * VEL(I) - (1 / (2 * BETA) - 1) * ACC(I)
    NEXT I

    FOR I = 1 TO NEQ
      DIS(I) = DIS(I) + RDIS(I)
      VEL(I) = SVEL(I)
      ACC(I) = SACC(I)
    NEXT I

    DIM DSA AS RDATA
    CALL FILE(2)
    FOR J = 1 TO NNP
      L = 3 * (J - 1) + 1 '応答変位、速度、加速度値
      K = (S - 1) * NNP + J をランダムファイルに落とす
      DSA.UDIS = DIS(L)
      DSA.VDIS = DIS(L + 1)
      DSA.RDIS = DIS(L + 2)
      DSA.UVEL = VEL(L)
      DSA.VVEL = VEL(L + 1)
      DSA.RVEL = VEL(L + 2)
      DSA.UACC = ACC(L)
      DSA.VACC = ACC(L + 1)
      DSA.RACC = ACC(L + 2)
      PUT #1, K, DSA
    NEXT J
  CLOSE #1
END IF
END SUB

```

5. まとめ

本研究では、立体ラーメン構造弾性振動解析プログラムと平面ラーメン構造弾塑性振動解析プログラムを開発し、様々な構造形式のラーメン構造について、平面および立体解析を行い、2種類の解析方法の結果を比べながら、構造の振動特性を調べ、また、弾塑性範囲では、ラーメン構造をいくつかの要素に分割し、各要素の平均曲げモーメントという概念を導き、比較的簡単な降伏条件式を用い、弾塑性解析を行った。

本研究によって得られる結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 立体ラーメン弾性振動プログラムを開発し、問題なく解析できることが分かった。
- (2) 形状対称、材料特性対称の構造あるいは偏心方向のみ地震力を作用する偏心構造(偏心方向に斜め部材がない場合)には平面解析でも誤差はほとんど生じないことが分かった。
- (3) 剛性偏心を生じる構造では、平面解析により高剛性ラーメンの最大応答変位はつねに安全側にあるが、低剛性ラーメンの最大応答変位が危険側にある傾向になりやすい。
- (4) 質量偏心を生じる構造では、最大応答変位の平面と立体解析の間の平均誤差は偏心方向の方が偏心がない方向より大きい。
- (5) 高橋脚のような高さでスパンの比が5以上の一層ラーメン構造では、地震波の入力方向が最大総水平変位量に及ぼす影響を無視できる。
- (6) 塑性化モードの違いが最大水平応答変位に及ぼす影響より、残留変形に及ぼす影響の方が顕著である。
- (7) 柱基部、頂部および梁端部の6箇所が塑性化すると

定めたケースでは、塑性箇所を特定しない実際に近い場合の履歴特性と応答変位、残留変位のいずれもよく一致していた。

参考文献

- 1) 第一線の設計者が語る耐震設計 日本規格協会
- 2) 建築構造力学の最近の発展 応力解析の考え方
- 3) 藤谷義信：パソコンで解く骨組の力学 pp109~
- 4) 河西朝雄：Quick Basic 初級プログラミング入門
- 5) 小堀為雄、吉田 博：有限要素法による 構造解析プログラム 丸善 pp53~73
- 6) T. Y. Yang著、当麻庄司、真柄祥吾訳：よく分かる有限要素構造解析入門 技報堂
- 7) 中島章典、小野寺 理：鋼製門形ラーメン橋脚の大地震時弾塑性挙動と耐震設計法におけるエネルギー一定則の適用性について 第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集 1998. 11
- 8) 池田 学等：鉄道鋼ラーメン橋脚の耐震設計法に関する検討 第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集 1998. 11
- 9) 村上 茂之等：鋼製ラーメン橋脚の地震時弾塑性動的応答解析 土木学会第54回年次学術講演会
- 10) 川口大介等：ラーメン高架橋の3次元骨組非線形地震応答解析 土木学会第52回年次学術講演会
- 11) 石川敏充等：立体骨組構造を対象とした複合非線形地震動応答解析法 土木学会第52回年次学術講演会
- 12) 堀上仁治、山本 宏：立体ラーメンの解析 昭和56年度卒業研究論文

(受理 平成12年3月18日)