

# 近畿大学工学部建築学科卒業研究概要

平成 15 年度		番号 氏名	00168073
指導教官	藤井 大地 助教授		中野 真一
題名	限界耐力設計法にもとづく構造設計プログラムの開発に関する基礎的研究		

## 1. はじめに

限界耐力設計法は、すでに汎用の一貫設計プログラムに組み込まれているため、ユーザーは、中身をあまり理解してなくても結果を出すことができる。しかしながら、仕様設計と異なり、性能設計は、かなりの部分を構造設計者の判断に任せる設計法であるため、構造設計者が中身をよく理解せずに、この設計法を用いることは危険である。また、限界耐力設計法を大学などで学習する場合、一貫設計プログラムを用いることはライセンス料の面からも難しく、また、中身の分からないものを教育の場で利用することが適切かどうかも議論のあるところである。

そこで、本研究では、平面骨組(2次元骨組)を対象として、限界耐力設計法で設計を行うための解析ソフトを開発する。また、解析ソフトは、誰もが容易に利用できる Excel のマクロ機能(Excel VBA)を用いて作成し、プログラムにコメント文などを付けて見やすくしている。

限界耐力設計法では、入力地震動の応答スペクトルも設計者が作成できるようになっているが、本研究ではこの部分は対象外とする(入力地震動の応答スペクトルは簡略法で計算するものとする)。すなわち、本研究の対象は、上部構造の地震外力分布の設定、静的漸増荷重解析、保有水平耐力の算定部分とする。この中で、特に、解析的に難しい部分は、静的漸増荷重解析である。そこで、本研究では、有限要素法に基づく骨組解析法により、静的漸増荷重解析プログラムを作成し、その有効性について検討している。

以下、本論文第2章では、性能設計と限界耐力設計法の概要を示し、その特徴を把握している。第3章では、上部構造の地震外力分布の設定法を示し、建物の固有振動解析から外力分布を計算するプログラムの概要を示している。第4章では、平面骨組の静的漸増荷重解析理論を示し、開発したプログラムの概要を示している。第5章では、骨組図を表示するプログラムをしめしている。第6章では、開発したプログラムの検証と、限界耐力設計法の設計手順を例題を通して説明している。

## 2. 限界耐力法の特徴

限界耐力設計法の流れは、まず、せん断波速度 400m/sec 程度以上の地盤を解放工学的地盤と位置づけ、そこに基準地震動として減衰 5%の加速度応答スペクトル(標準スペクトル)を規定する。このとき、中地震動は大地震動の 1/5 の大きさとする。これは、従来法の 1 次設計用  $C_0 = 0.2$ , 2 次設計用  $C_0 = 1.0$  の関係に整合させたものである。この標準スペクトルに地盤増幅係数  $G_s$  を乗じて、建物への入力地震動

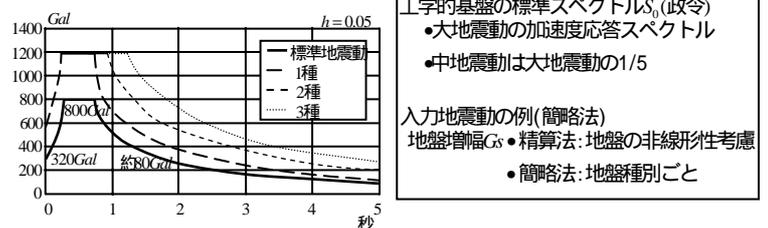
の加速度応答スペクトルを算定する。このとき、 $G_s$  の評価法としては、従来法の  $R_f$  に対応するかたちで地盤種別ごとに増幅率を定めた簡略法と地盤調査結果に基づいて地盤の非線形性を考慮して増幅率を算定する精算法の 2 種類が用意されている。

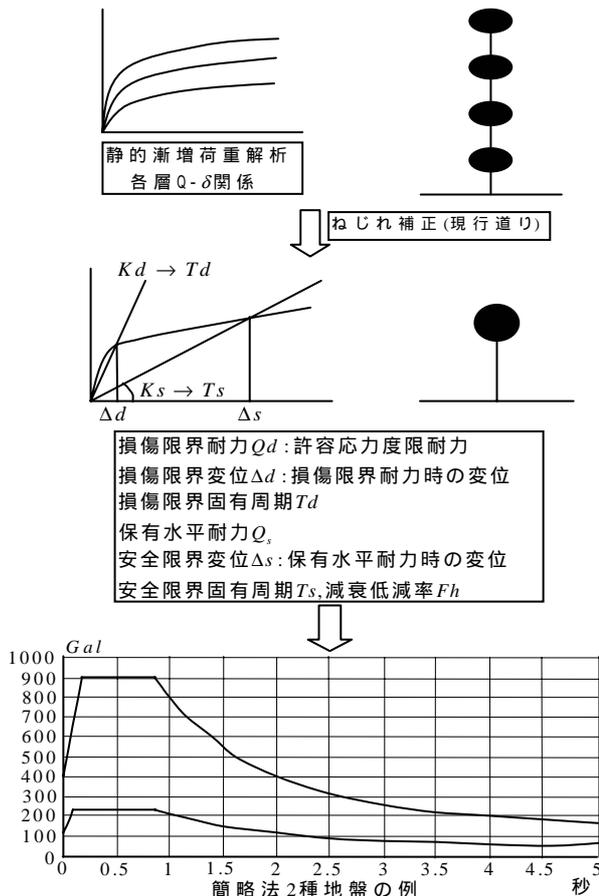
一方、対象建物は静的漸増荷重解析(Pushover 解析)などにより、損傷限界耐力と損傷限界変位、損傷限界固有周期を評価し、これらから換算される等価縮約 1 自由度系の中地震時の応答加速度を求め、中地震時の応答せん断力(従来法の 1 次設計せん断力)を評価する。この水平力に対して許容応力度設計を行い、層間変位角 1/200 以下を確認する。同様に保有水平耐力(安全限界耐力)、安全限界変位、安全限界固有周期を求め、安全限界変位時の塑性化状況から履歴による等価減衰定数を算定して、等価 1 自由度系の大地震時の応答加速度を求め、大地震時の応答せん断力(従来法の必要保有水平耐力従来法)を評価し、保有水平耐力がこの応答値を上回っていることを確認する。

図-1 でわかるとおり、最後の確認内容は従来法とまったく同様であるが、そこに用いるべき設計せん断力を仕様規定的に定めるのではなくて、建物の耐力、変形性能、減衰性能を考慮したモデルにより応答スペクトル法で算定された応答値として評価するところが限界耐力計算の特徴である。

応答スペクトルでは、まず、限界耐力計算の基本となっている応答スペクトル法について以下に説明する。なお、政令・告示には加速度応答スペクトルを用いて応答せん断力を評価する手法が示されており、以下に紹介する方法は、政令・告示に目に見えるかたちで現れるものでないが、限界耐力計算の理論的背景を理解するうえで有用であると考えられるのでその内容を解説するものである。

この方法は、図-3 に示すように建築物全体の構造特性を表す耐力曲線と想定する地震動の応答スペクトルを重ね合わせることによって、その交点から建築物の最大応答値を推定する手法で、応答スペクトルとしては、 $S_a-S_d$  曲線、建築物の構造特性としては等価 1 自由度系に縮約した断塑性特性曲線が用いられる。





建築物の各階に作用する地震力の算定 (政令)

中地震  $Q_{d_i} = \sum (m_i \cdot B_{d_i} \cdot S_0 \cdot G_s \cdot Z)$   
 (上図は  $S_{ad} = S_0 \cdot G_s$ )

$Q_{d_i}$  加力時の層間変位  $\delta_{d_i}$

大地震  $Q_{s_i} = \sum (m_i \cdot B_{s_i} \cdot S_0 \cdot F_h \cdot G_s)$   
 (上図は  $S_{as} = S_0 \cdot F_h \cdot G_s$ )

Z: 地域係数 (現行通り)

$B_{s_i}$ : 告示 =  $A_i$  分布からの逆算した震度分布

Fh: 告示 =  $1.5 / (1 + 10h)$

h: 告示 = 部材ごと、又は建物全体での評価

結果の判定 (政令)

中地震  $Q_d > Q_{d_i}$   
 $\delta_d < 1/200$

大地震  $Q_s > Q_{s_i}$

図-1 限界耐力設計法の流れ

### 3. $A_i$ 分布、 $B_i$ 分布について

平成 12 年建告第 1457 号第 2 の表中に規定される加速度の分布  $bd_i$  は、昭和 55 年建告第 1793 号第 3 に規定される層のせん断力分布係数を表す係数を層の水平力分布を表す係数に変換したものである。従って、従来  $A_i$  分布を求める計算方法に従って求めた各層のせん断力分布と、平成 12 年建告第 1457 号第 2 の表中に規定される加速度の分布  $bd_i$  により求めた各階の水平力の和として求めた各階のせん断力の分布は等しくなる。したがって、外力分布として  $A_i$  分布を使っても  $bd_i$  分布を使っても、結果(各階の層せん断力)は同じになる。

しかし、両者の値は異なっている。 $A_i$  は必ず最下階で 1.0 になるが、 $bd_i$  は建物の途中で 1.0 になる。これは  $A_i$  の値は一階の層せん断力係数が基準になるので一階を 1 にするが、 $bd_i$  の値は建物の代表点(つまり等価一質点系の質点位置)が基準になるので建物の途中が 1 になる。

本解析ソフトは、Excel VBA で作成し、データの入出力は

Excel のセルを利用して行う。図-4 はデータシートの一例を示したものである。図-2 に示す新規作成フォームに層階を入力し、「OK」をクリックすれば、シート上に質量と剛性を入力できるようになる。 $A_i$  分布の時に、層階と質量が必要になり、 $B_i$  分布の時に、層階と質量と剛性が必要になる。これらを入力し、「 $A_i$  分布と  $B_i$  分布の計算」をクリックすると  $A_i$  分布と  $B_i$  分布が求まり  $B_i$  分布にいたっては、固有振動、固有周期、固有円振動数、固有モード、刺激係数、刺激関数が求まるようになっている。そしてまた、図-3 に示すようなフォームで地震地域係数と地盤の硬軟を選択し、応答ベースシアー係数を入力して、「層せん断力係数  $C_i$ 」をクリックすると外力分布となる  $P_i$  を求めることができる。 $A_i$  分布では、 $Q_i$  分布も出るようになっている。

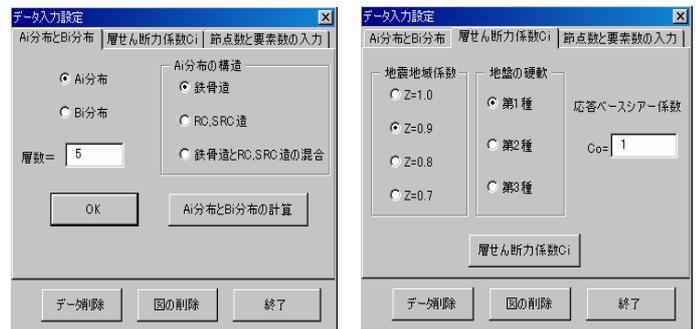


図-2 初期設定と  $A_i$  分布、 $B_i$  分布計算

図-3  $C_i$  と  $P_i$  の計算

層数	質量[M]	剛性[K]	[固有振動数]固有周期 $\omega$	[ω]						固有モード	
1	1000	100	0.013353	74.89155	0.083897	0.05444	0.05602	-0.04298	-0.0269	0.036438	4.324365
2	1000	100	0.037262	26.8367	0.234127	0.105047	0.091332	-0.02961	0.006207	-0.03768	-1.30491
3	1000	70	0.057628	17.3527	0.362087	0.166781	0.053803	0.044943	0.033721	0.020445	0.941388
4	1000	70	0.07517	13.30317	0.472307	0.211745	-0.01586	0.035317	-0.04623	-0.01001	-0.76586
5	1000	70	0.087747	11.39642	0.55133	0.235416	-0.0731	-0.04046	0.021139	0.002994	0.082163
	$A_i$ 分布	$B_i$ 分布	層せん断力 $C_i$	刺激係数 $\beta$	刺激関数 $\beta$						刺激関数
1		0.296366	0.179438	5.443954	0.296366	0.313821	0.184688	0.072354	0.132771	23.54164	
2	1.210464	0.571872	0.217203	5.601973	0.571872	0.455562	0.127237	-0.0167	-0.13903	-7.31006	
3	1.457276	0.907948	0.26149	-4.23754	0.907948	0.301406	-0.19315	-0.0807	0.07496	-4.04565	
4	1.781636	1.152728	0.319692	-2.68897	1.152728	-0.06883	-0.15178	0.124341	-0.03646	2.113873	
5	2.347398	1.281596	0.421211	3.643769	1.281596	-0.40951	0.173863	-0.05686	0.010909	0.299382	
	$P_i$	$P_i$	$Q_i$								
1	28.3772	59.27326	897.1875								
2	84.34055	114.3744	868.8103								
3	145.0851	181.5897	784.4697								
4	218.1734	230.5455	639.3846								
5	421.2112	256.3192	421.2112								

図-4 データシートの一例

### 4. Pushover 解析

Pushover 解析プログラムは、構造物(部材の非線形性を考慮)に対して静的な震度や荷重を漸増荷重して、その荷重(震度)と水平変位の関係等によって構造物全体の耐震特性を評価しようとするものである。この解析によれば、構造物の損傷過程や全体の耐震性能を精度よく再現することができる。

大地震などの発生により、構造物に過大な荷重が作用した場合には、荷重と変形の関係が弾性範囲を超え、塑性範囲におよぶ場合がある。そのような構造物に過大な荷重が作用し、部材が塑性化するような骨組の塑性解析について考える。

崩壊荷重とは、構造物に作用する荷重が徐々に増大すると、構造物内に発生する応力は増加し、やがて、構造物は荷重に耐えられなくなって崩壊してしまう。そのときの荷重を崩壊荷重あるいは、終局荷重という。この崩壊荷重は建築物が持っている耐力を評価する上で重要となる。

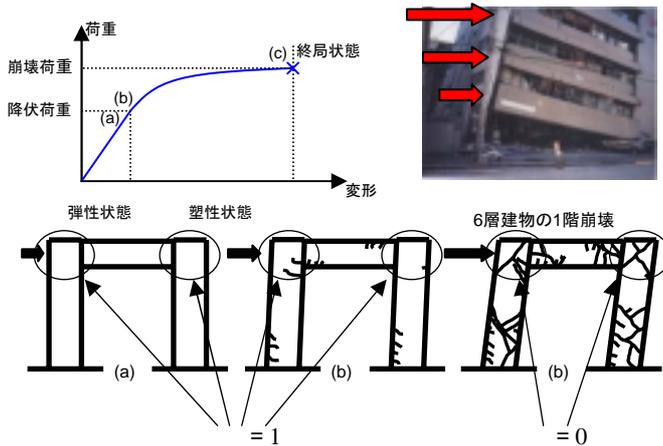


図-6 変形と崩壊荷重の関係

本解析ソフトは、外力分布を細かく分割し、骨組解析からの変位を足し合わせる。要素の両端に長さ0の回転バネを用いて、この回転バネの合成の大きさを定めるパラメータを置く。曲げモーメントを降伏関数で割って1以下になると塑性化状態となり  $\alpha = 0$  と置き剛性が弱くなる (図-5 参照)。

図-6 の左側で、剛性計算をさせていて、右側で降伏判定をしているプログラムを示す。解析結果の変形角が 1/200 になるとそこでプログラムを終わらす。

```

' は最初1で壊れたら 0.000001
Rami = ram(ne, 1)
Ramj = ram(ne, 2)

Sub 降伏関数の計算()
For i = 1 To nel
  YMz = Cells(n2 + i, 12)
  塑性曲げモーメントの読み込み
  降伏関数
  YFnc(i, 1) = Abs(str(i, 5) / YMz)
  降伏関数
  YFnc(i, 2) = Abs(str(i, 6) / YMz)
  If YFnc(i, 1) >= 1# Then
    ram(i, 1) = 0#
  If YFnc(i, 2) >= 1# Then
    ram(i, 2) = 0#
Next i
Exit Sub
End Sub

cv = 6# * eyg(ne) * sii(ne) / 1^3
ke(2, 2) = cv * (Rami + Ramj + 4 * Rami * Ramj) /
(1 + Rami + Ramj)
ke(5, 2) = ke(2, 2)
ke(5, 2) = -ke(2, 2)
ke(2, 5) = -ke(2, 2)

Next i
Exit Sub
End Sub

cw = 6# * eyg(ne) * sii(ne) / 1^2
ke(3, 2) = cw * (Rami * (1 + 2 * Ramj)) /
(1 + Rami + Ramj)
ke(2, 3) = ke(3, 2)
ke(5, 3) = -ke(3, 2)
ke(3, 5) = -ke(3, 2)
ke(6, 2) = cw * (Ramj * (1 + 2 * Rami)) /
(1 + Rami + Ramj)
ke(2, 6) = ke(6, 2)
ke(6, 5) = -ke(6, 2)
ke(5, 6) = -ke(6, 2)

cx = 6# * eyg(ne) * sii(ne) / 1
ke(3, 3) = cx * (Rami * (1 + Ramj)) / (1 + Rami + Ramj)
ke(6, 6) = cx * (Ramj * (1 + Rami)) / (1 + Rami + Ramj)
ke(6, 3) = cx * ((Rami * Ramj) / (1 + Rami + Ramj))
ke(3, 6) = ke(6, 3)

```

図-6 塑性化する時のプログラムの一部

Pushover 解析ソフトは、外力分布にあたる  $P_i$  分布を使うことによって、崩壊荷重を求めることができる。図-9 のユーザーフォームで節点数と要素数を入力すると自動的に入力シートが示される。そこで、節点の座標値と節点に加わる荷重値、節点の拘束条件、要素両端の節点番号、要素のヤング係数、断面積、断面二次モーメント、要素に加わる分布荷重値、変形角、分割数、塑性モーメント値、部材の長さを入力し解析を行う。そして、分割させた外力値と止まったステップ数を乗じると崩壊荷重が求められる。

5. Pushover 解析の比較

図-7 のような、5 層 3 スパンラーメンの保有水平耐力を仮想仕事法を用いて求める。ただし、各層の重量は一定 ( $W$ ) とし、水平荷重は、ラーメン全体の 1 次固有周期は  $T = 0.5s$  とする。また、 $i$  床に作用する水平荷重は次式で表す。

$$P_i = Q_i - Q_{i+1} \quad (1)$$

ただし、 $Q_i = C_i \sum_{j=i}^n W_j$  ;  $C_i = A_i \times 0.2$

$$Q_{i+1} = C_{i+1} \sum_{j=i+1}^n W_j ; A_i = 1 + \left( \frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} - \alpha_i \right) \frac{2T}{1+3T} ; \alpha_i = \frac{\sum_{j=i}^n W_j}{\sum_{j=1}^n W_j}$$

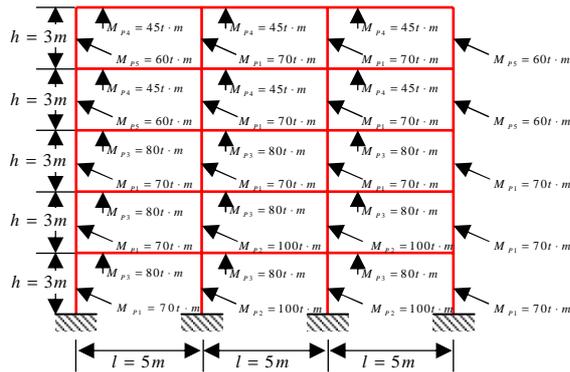


図-7 5層3スパンラーメン

式(1)を用いて水平荷重を算出すれば、表 1 の最右欄に示す結果が得られる。

表 1 (単位: t)

i 床	$\alpha_i$	$A_i$	$\sum M_i$	$Q_i$	$P_i$
1	1.0	1.00	5W	1.00W	0.10W
2	0.8	1.13	4W	0.90W	0.13W
3	0.6	1.28	3W	0.77W	0.18W
4	0.4	1.47	2W	0.59W	0.23W
5	0.2	1.81	W	0.36W	0.36W

メカニズムの中で、最小の時に得られる  $\lambda_c = \lambda_f = 592/Wh$  のとき、各層の保有水平耐力は

- 1 層:  $Q_{U1} = \lambda_c Q_1 = 592 \times 1.00 / 3 = 197t$
- 2 層:  $Q_{U2} = \lambda_c Q_2 = 592 \times 0.90 / 3 = 178t$
- 3 層:  $Q_{U3} = \lambda_c Q_3 = 592 \times 0.77 / 3 = 152t$
- 4 層:  $Q_{U4} = \lambda_c Q_4 = 592 \times 0.59 / 3 = 116t$
- 5 層:  $Q_{U5} = \lambda_c Q_5 = 592 \times 0.36 / 3 = 71t$

と、なり崩壊メカニズムは図-8 のようになる。

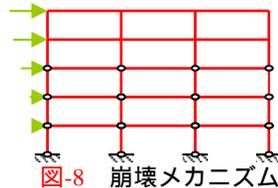


図-8 崩壊メカニズム

節点ふり分け法と層モーメント分配法と仮想仕事法で計算したものを表 2 に示す。  $Q_{umi}$  は、 $i$  層の保有水平耐力(塑性解析より算定したもの)である。

表 2 保有水平耐力 (単位: t)

層	$Q_{umi}$	節点ふり分け法	層モーメント分配法	仮想仕事法
1	192	193	197	197
2	172	167	178	178
3	148	147	152	152
4	113	118	133	116
5	69	122	87	71

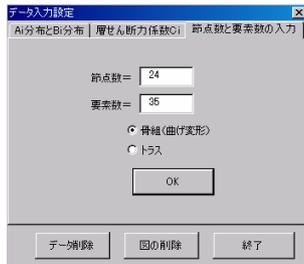


図-9 節点数と要素数の入力

この図-7の問題をプログラムで解いてみると、荷重  $P_i$  より、各ステップの  $u, v, \theta, N_i, N_j, Q_i, Q_j, M_i, M_j$  値を算出して行き、それらをステップごとに足し合わせていく。そして、塑性領域に達したときの柱の変位角を決めておき、その変位角に達したときに建物が崩壊したとみなされ、プログラムを止めるようにしている。

今回は、表1に表す  $P_i$  を外力分布とし、 $W = 1000$  として代入し、解析すると崩壊荷重が得られ保有水平耐力が求まる。

1階の柱の断面積は  $4900 \text{ cm}^2$ 、2階,3階では  $4225 \text{ cm}^2$ 、4階,5階の場合では  $3600 \text{ cm}^2$  とする。また、梁の2階の断面積は  $3000 \text{ cm}^2$ 、3階では  $2800 \text{ cm}^2$ 、4階では  $2600 \text{ cm}^2$ 、5階では  $2275 \text{ cm}^2$ 、R階の場合では  $2100 \text{ cm}^2$  としている。解析結果を表3に示し、崩壊系を図-10に示す。

表3 (単位: t)

層	崩壊荷重	せん断力	$Q_{umi}$
1	19.14075	191.40750	192
2	24.88298	172.26675	172
3	34.45335	147.38377	148
4	44.02373	112.93042	113
5	68.9067	68.906700	69

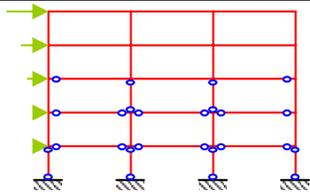


図-10 崩壊形

表3より、保有水平耐力は、 $i$ 層の保有水平耐力  $Q_{umi}$  とほぼ同じ値を得られることができる。部材の塑性化した場所も同じである。

次に、その各ステップの層ごとの  $u$  と最上階から  $i$ 階までの外力の和をプロットしその関係を表したものが図-11である。

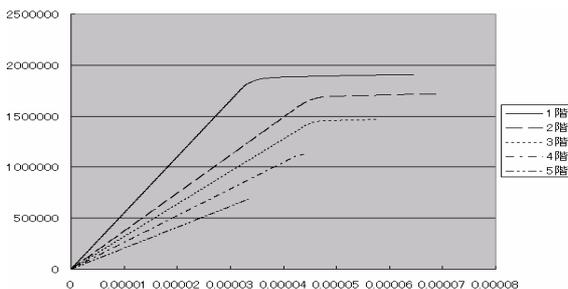


図-11  $Q-\delta$  の関係

次に、図-12の  $Sa-Sd$  曲線を求められるようになっていて、それと入力地震動(梅村スペクトル)とを合わせたところが応答値となる。

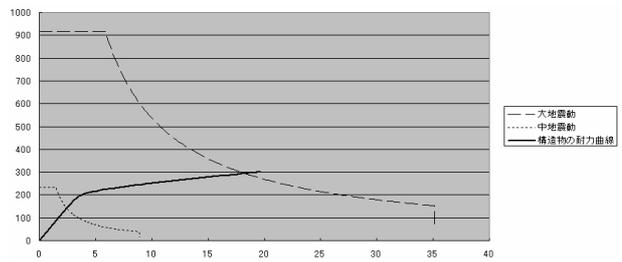


図-12  $Sa-Sd$  曲線

## 6. まとめ

本論文は、限界耐力設計法にもとづく構造設計プログラムの開発に関する基礎的研究を行った。そこで、上部構造の地震外力分布の設定、Pushover 解析、保有水平耐力の算定部分を誰もが容易に利用できる Excel のマクロ機能(Excel VBA)を用いてプログラム化した。開発したプログラムでは、建物の階数を入力し、各階の質量と剛性入力すれば  $A_i$  分布や、固有振動数から1次の刺激関数  $\beta\{u\}$  から  $B_i$  分布を求めることができ、そこから、 $P_i$  分布を求めることができる。次に、有限要素法による骨組の Pushover 解析プログラムを作成した。本プログラムにより平面骨組の崩壊荷重を求めることができる。構造計算上は、軸方向変位は無視することになっているが本プログラムは、軸力を考慮するので、断面積を大きくすることで軸力方向変位を無視して解析をした。また、軸力方向を考慮した場合と、どれくらい違ってくるのかを検証した。すると、軸力方向変位を考慮すると、崩壊荷重が  $0.03t \sim 0.07t$  小さくなり、せん断力は  $0.1t \sim 0.3t$  小さくなった。

また、グラフィックスでは、骨組図、変位図、断面力図、崩壊形を表示することができるようになっている。ここで、Pushover 解析で塑性化がわかり、これを自動的に壊れる場所に順番で塑性化していく様子が見えるようなグラフィックが描けるようにし、また、限界耐力設計法に必要な  $Sa-Sd$  曲線を求めることができる。これより、簡略法の入力地震動と重ねて応答値を得ることができる。以上により本研究で開発した一連のプログラムを用いれば、平面骨組の損傷限界耐力、安全限界耐力を求められる。

## 参考文献

- (1) 最新耐震構造解析, 柴田明德著, 森北出版株式会社
- (2) 株式会社構造ソフト,  
(<http://www.kozosoft.co.jp/gijyutu/2008/si/sitani.pdf>)
- (3) 有限会社ストラクチャー (<http://www.structure.jp/>)
- (4) 改正建築基準法[構造の性能規定化]を解く, NPO 法人建築技術支援協会編著, 彰国社
- (5) よくわかる構造力学の基本, 松本慎也著, 秀和システム
- (6) 建築技術支援協会  
(<http://www.psats.or.jp/column/suganocolumn.html>)
- (7) 入門・塑性解析と設計法, 石川信隆/大野友則共著, 森北出版株式会社