

近畿大学工学部建築学科卒業研究概要

平成 16 年度		番号	01168013 01168031	01168023
指導教官	藤井 大地 助教授	氏名	岩橋 雅義 川井 彰訓	奥田 英充
題名	建築物の 3 次元骨組解析に関する研究			

1 はじめに

近年、建築物の構造計算は、ほとんどの場合、汎用の構造解析ソフトを用いて行われるようになった。このようなソフトを用いれば、データの入力さえ行えば、構造設計の仕様書まで、自動的に作成されるため便利である。しかしながら、このような構造解析ソフトは一般にライセンス料が高く、個人で購入することは難しい。そのため、デザイナーと構造設計者の棲み分けができてしまい、構造設計はこのような汎用ソフトを有する会社が専門に行うようになってきている。

しかしながら、骨組の構造解析は、ビルの構造設計だけではなく、現場の足場や支保の安全性の計算、基礎の山止めの計算などあらゆる場面で必要となるものである。しかし、汎用ソフトは、このような技術者に身近な計算を行うには、コストの面からも使い勝手の面からも適していない。また、最近では、柱と梁の見分けがつかないような構造を有するビルも建てられるようになった。このような構造を汎用ソフトで計算することは不可能と言ってよい。

以上のような問題を解決するには、技術者がもっと手軽に構造解析が行えるソフトの開発が必要である。そこで、本研究では、誰でも手軽に利用できる Excel のマクロ機能を利用した 3 次元骨組（立体骨組）の建築構造解析ソフトを開発する。本研究で開発するソフトは、立体骨組の静的弾性解析、静的弾塑性解析、固有振動解析、弾性地震応答解析、弾塑性地震応答解析を行うことができるものとする。本論文では、それぞれのソフトの有効性を手計算または他の手法で解が求められている基本的な例題で検証し、また、実務の例題として、平成 13 年芸予地震によって被害を受けた沖美町庁舎を取り上げ、構造解析ソフトの実用性を検討する。

2 静的弾性解析

2.1 解析法の概要

立体骨組解析は、図 1 に示すように、対象とする骨組構造をはり要素に分割し、1 つのはり要素に関して、要素剛性方程式（節点変位と節点力の関係式）を作る。そして、節点での連続性と節点力の釣合を考慮して、重ね合わせを行い、全体剛性方程式を、境界条件を考慮して解く。以上の解析全体の流れ図（フロー）を図 2 に示す。

2.2 作成したソフトの概要と有効性の検討

まず、手計算で解を求めることができる例題として、図 3 に示す交叉ばりの例題を解析する。この例題は、仮想仕事法によって解くことができる¹⁾。

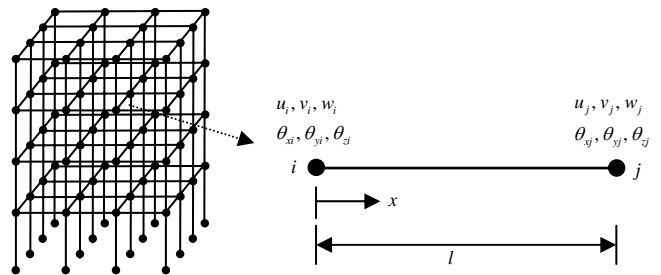


図1 骨組構造の有限要素分割とはり要素

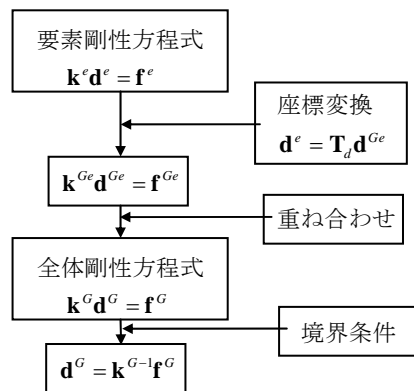


図2 解析のフロー

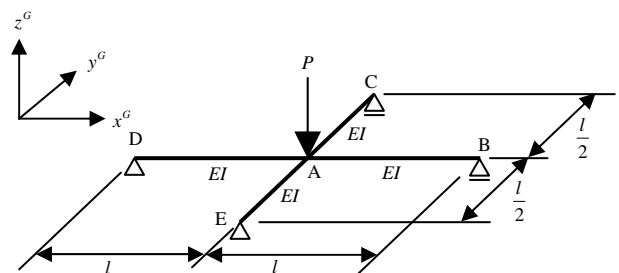


図3 交叉ばりの例題

作成したソフトでは、図 4 に示すようなユーザーフォームにデータを入力すると図 5 に示すデータ入力フォームが作成される。これに、図 3 に示す交叉ばりのデータを入力したものが図 6 である。本ソフトでは、入力データから、図 7 に示すような支持条件と荷重条件が付加された骨組図を表示させることができる。また、図 8 は、シート上に示される解析結果を示す。図 9 は、結果を表示するためのユーザーフォームを示す。図 10 は、本ソフトで表示された変位図と曲げモー

メント図を示したものである。

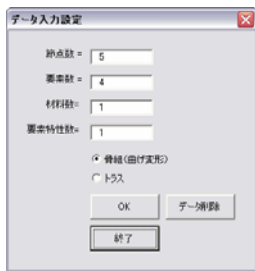


図4 データ入力設定フォーム

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
2	人カグループ															
3	節点数	5	材料数	1												
4	要素数	4	特性数	1												
5	材料番号	E	G													
6	特性番号	A	Jy	3z	K											
7	1	100	833	833	1666											
12	節点番号	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	要素番号	節点1	節点2	材料番号	特性番号	ax1	ax2	ax3	ax4	ax5	ax6	ax7	ax8	ax9	ax10	ax11
19	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	3	1	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	4	1	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	5	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図5 データ入力設定後のExcelシート

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
2	人カグループ															
3	節点数	5	材料数	1												
4	要素数	4	特性数	1												
5	材料番号	E	G													
6	特性番号	A	Jy	3z	K											
7	1	100	833	833	1666											
12	節点番号	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	3	-100	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	5	0	-50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	要素番号	節点1	節点2	材料番号	特性番号	ax1	ax2	ax3	ax4	ax5	ax6	ax7	ax8	ax9	ax10	ax11
19	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	3	1	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	4	1	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	5	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図6 データ入力済みのExcelシート

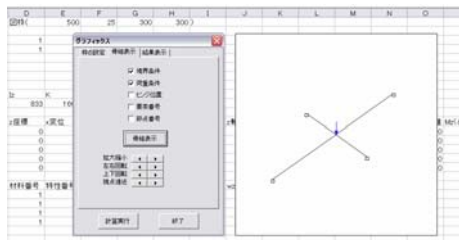


図7 骨組表示 (データチェック)

24	出力データ															
25	節点番号	x	y	z	fx	fy	fz									
26	1	0	0	0	-0.00198	0	0									
27	2	0	0	0	-1.64646	0	0									
28	3	0	0	0	3.24E-05	0	0									
29	4	0	0	0	1.62E-05	0	0									
30	5	0	0	0	-3.24E-05	0	0									
34	要素番号	Nx	Ny	Qx	Qy	Mx	My	Gx	Gy	Mx	My	Mx	My	Mx	My	
35	1	0	0	0	0	0	0	0	-0.05556	-0.05556	5.55556	0	0	0	0	
36	2	0	0	0	0	0	0	0	-0.66664	-0.66664	22.2222	0	0	0	0	
37	3	0	0	0	0	0	0	0	-0.05556	-0.05556	5.55556	0	0	0	0	
38	4	0	0	0	0	0	0	0	-0.05556	-0.05556	5.55556	0	0	0	0	
39	5	0	0	0	0	0	0	0	-0.66664	-0.66664	22.2222	0	0	0	0	
41	節点番号	ax	ay	az	bx	by	bz									
42	1	0	0	0	0.055556	0	0									
43	2	0	0	0	0.666644	0	0									
44	3	0	0	0	0.055556	0	0									
45	4	0	0	0	0.666644	0	0									

図8 出力データ

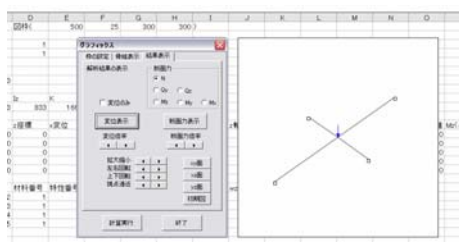


図9 結果表示のページ

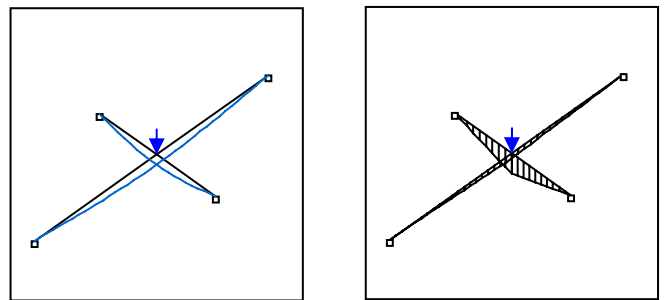


図10 変位図と曲げモーメント

以上の解析で、DB 部材と CE 部材の A 点位置の曲げモーメントが 5.56、22.22 となり、仮想仕事法で求めた正解 $PI/18$ と $2PI/9$ と一致することがわかった。

2.3 実務的例題の解析モデル

実務的例題として、芸予地震によって被害を受けた沖美町庁舎を取り上げ、作成したソフトの実用性を検討する。この建物は、節点数 86、要素数 143、材料数 1、特性数 18 である。図 11 は、本ソフトで表示した骨組図を示す。ただし、荷重は、積載+固定荷重を $10kN/m^2$ とした。

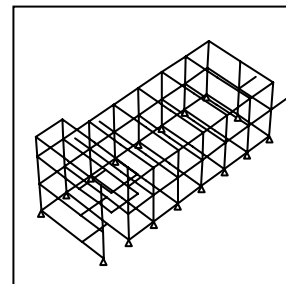


図11 沖美町庁舎の骨組図

2.4 庁舎モデルの静的弾性解析例

図 11 に示す解析モデルで、長期および短期荷重に対する解析を行った。短期の水平荷重は A_i 分布を用いた。

図 12 は、短期荷重に対して得られた部材断面力から各部材の応力度と許容応力度の比を計算し、比較的大きな応力度比となっている部材を示している。

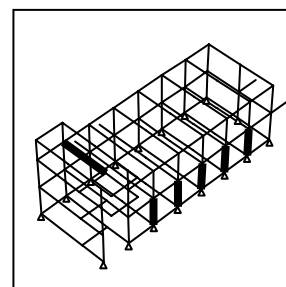


図12 応力度比が大きくなった部材

3 静的弾塑性解析

3.1 解析法の概要

静的弾塑性解析は、図 13 に示すように要素両端にバネを設け、荷重を少しずつ増加させ、降伏した材端のバネ剛性を 0 にしていく方法を採用した。

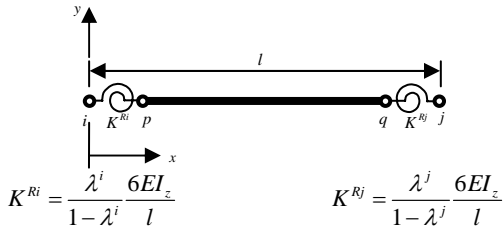


図13 両端に回転バネを有する要素

3.2 作成したソフトの概要と有効性の検討

作成したソフトの有効性を検討するため、図 14 に示す例題²⁾の解析を行った。

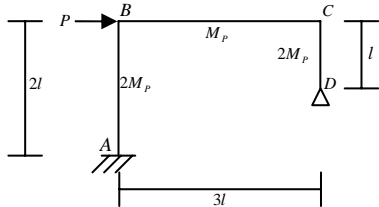


図14 1層1スパンラーメンの例題

図 15 は、入力データを示す。解析を行った後、図 16 のテキストボックスで、見たい節点番号を選択すると、セル上にもその節点の荷重-変位履歴が表示される。仮想仕事法で求めた崩壊荷重が 250kN であるのに対して、本解析では、251.5kN となっており、多少の誤差があるが、ほぼ近い値が得られている。なお、荷重増分ステップ数を 1000 にすると 250.2kN となり誤差が小さくなる。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	入力データ															
2	1 要素数= 4 材料数= 1 Step数= 100															
3	2 節点数= 3 材料数= 2															
4	3 材料番号 E															
5	1 20000 7003															
6	7 8															
9	特性番号 A ty tz Kx Myo Mz Pxo Qx Pxo Qx															
10	1	1.00E+03	833	833	1666	40000	40000	1.00E+03	0.5	2	0	0	0	0	0	0
11	2	1.00E+03	833	833	1666	20000	20000	1.00E+03	0.5	2	0	0	0	0	0	0
12	12 節点番号 自由度 ばね剛性 ばね剛性 ばね剛性 ばね剛性 ばね剛性 ばね剛性 ばね剛性 ばね剛性 ばね剛性 ばね剛性 ばね剛性 ばね剛性 ばね剛性 ばね剛性 ばね剛性															
14	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
15	2	0	400	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
16	3	600	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	4	600	200	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
18	18 要素番号 節点 材料番号 特性番号															
20	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	2	2	3	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	3	3	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図15 入力データ



Q	R	S	T
節点番号=	2 変位	荷重	
	(x方向)	0	0
		43.512551	195
		62.89871	226.2002
		94.388285	251.54956

図16 テキストボックスと出力された変位-荷重データ

3.3 庁舎モデルの静的弾塑性解析例

図 17 は、図 11 の解析モデルの静的弾塑性解析を行い、塑性ヒンジの発生状況を本ソフトで表示したものである。図に示すようにヒンジの発生は西側の基礎部分から崩壊が始まり、東側の基礎、1 階部分、2 階部分、ペント階と柱から崩壊していく形になった。

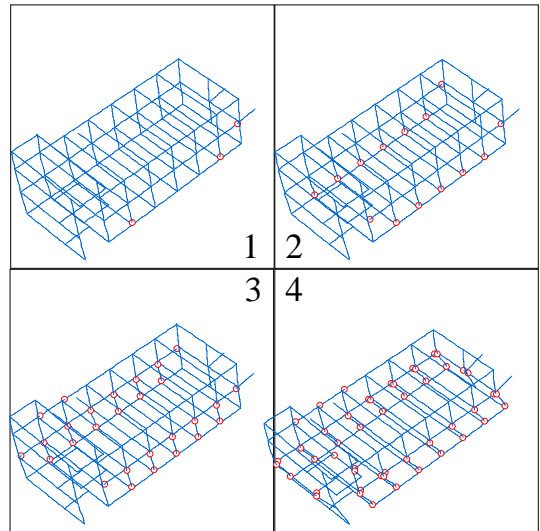


図17 ヒンジ位置と変位

4 動的解析

4.1 解析法の概要

動的解析は、固有振動解析、弾性地震応答解析、弾塑性地震応答解析について、プログラムの作成を行った。固有振動解析の固有値問題はハウスホルダーバイセクション法を用いて解いている。また、地震応答解析は、平均加速度法によって、数値積分を行った。弾塑性地震応答解析は、同様の方法に、3章の静的弾塑性解析法を適用している。

4.2 プログラムの概要と有効性の検討

4.2.1 固有振動解析

作成したソフトの有効性を確かめるために、図 18 のような 1 層鉄筋コンクリートラーメンの固有振動解析を行った。断面・材料定数は、図 18 に示す³⁾。

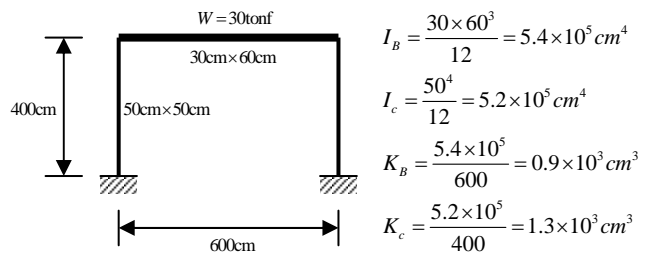


図18 1層1スパンラーメンの問題

図 19 は入力データを示し、図 20 は計算結果を示す。本問

題の D 値法で求められた固有周期は 0.20 秒であり、本解析結果 0.198 秒とほぼ一致した。また、図 21 は、結果を表示するためのユーザーフォームとこれによって図示した変位モードを示している。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	入力データ									
2										
3	節点数=	4	材料数=	2	モード数=	1				
4	要素数=	3	特性数=	2						
5										
6	材料番号	E	G	P						
7	1	205800	88200	0						
8	2	205800	88200	2.78E-05						
9										
10	特性番号	A	Iy	Iz	K					
11	1	2500	5.20E+05	5.20E+05	1040000					
12	2	1.80E+03	1.08E+06	1.08E+06	2160000					
13										
14	節点番号	x座標	y座標	z座標	x変位	y変位	z変位	x軸回転	y軸回転	z軸回転
15	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
16	2	600	0	0	1	1	1	1	1	1
17	3	0	400	0	0	0	1	1	1	0
18	4	600	400	0	0	0	1	1	1	0
19										
20	要素番号	節点1	節点2	材料番号	特性番号	wxi	wyj	wzi	wxi	wzi
21	1	1	3	1	1	0	0	0	0	0
22	2	2	4	1	1	0	0	0	0	0
23	3	3	4	2	2	0	0	0	0	0

図19 入力データ

25	出力データ						
26							
27	モード番号	振動数(Hz)	周期(sec)				
28	1	5.0460081	0.198176				
29							
30	モード番号	1					
31	節点番号	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
32	1	0	0	0	0	0	0
33	2	0	0	0	0	0	0
34	3	1	0.006693	0	0	0	-0.00124
35	4	1	-0.00669	0	0	0	-0.00124

図20 出力データ

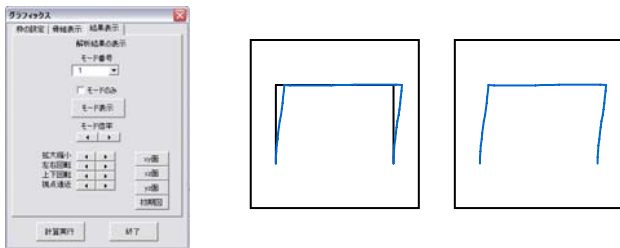


図21 結果表示ユーザーフォームと固有モードの表示

4.2.2 弾性地震応答解析

次に、同じ例題³⁾で振動数 p の調和地動を与えた場合の弾性地震応答解析を行う。

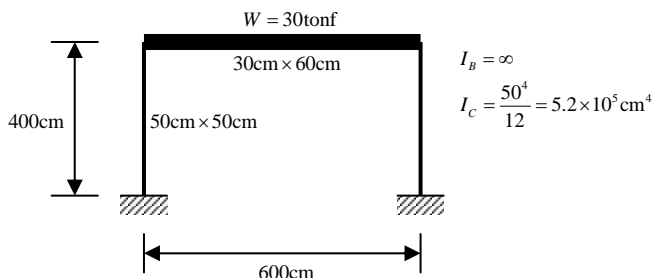


図22 1層1スパンの例題

図 23 は、入力データを示し、図 24 は最大変位応答の結果を示している。理論解は、(a), (b), (c)の場合で、0.77cm, 22.38cm, 5.33cm であり、本解析結果と近い値となった。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	入力データ																
2																	
3	節点数=	4	材料数=	2	モード数=	1											
4	要素数=	3	特性数=	2	固有周期=	0.17	モード=	弾性地動									
5																	
6	材料番号	E	G	P													
7	1	205800	88200	0													
8	2	205800	88200	0.00E+00													
9																	
10	特性番号	A	Iy	Iz	K												
11	1	2500	5.20E+05	5.20E+05	1040000												
12	2	1.80E+03	1.08E+06	1.08E+06	2160000												
13																	
14	節点番号	x座標	y座標	z座標	x変位	y変位	z変位	x軸回転	y軸回転	z軸回転	質量	質量	質量	質量	質量	質量	質量
15	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
16	2	600	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
17	3	0	400	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
18	4	600	400	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
19																	
20	要素番号	節点1	節点2	材料番号	特性番号	wxi	wyj	wzi	wxi	wyj	wzi	質量	質量	質量	質量	質量	質量
21	1	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	2	2	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	3	3	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図23 入力データ

	A	B		A	B		A	B		
25	出力データ			25	出力データ			25	出力データ	
26				26				26		
27	最大変位応答			27	最大変位応答		27	最大変位応答		
28	節点番号	u		28	節点番号	u		28	節点番号	u
29	1	0		29	1	0		29	1	0
30	2	0		30	2	0		30	2	0
31	3	-0.79746		31	3	-20.562		31	3	4.651454
32	4	-0.79746		32	4	-20.562		32	4	4.651454

(a)p=20(rad/sec)

(b)p=36.6(rad/sec)

(c)p=45(rad/sec)

図24 出力データ

4.3 既存建物の解析例

4.3.1 固有振動解析

次に、図 11 に示される例題の固有振動解析を行った。質量は固定+積載荷重を節点での集中質量として入力した。1次固有周期 0.35 秒となった。

4.3.2 弾性地震応答解析

次に同じ例題で芸予地震に対する弾性地震応答解析を行った。その結果、最大変位は 3.1cm、最大速度は 61.4cm/s、最大加速度は 378.2cm/s² となった。

4.3.3 弾塑性地震応答解析

同じ例題で、弾塑性地震応答解析を行い、ヒンジの発生状況を調べた。

5 まとめ

本論文では、建築物の 3 次元骨組解析ソフトを作成し、その有効性を検討した。基本的な例題により、本ソフトで、実務に耐えうる近似的な解析解を得ることができることが確かめられた。

また、沖美町庁舎の例題は、設計図を基に伏図、軸組図を AutoCAD を利用して作成した。また、柱、梁の材料定数を鉄筋を考慮して計算し、入力データを作成した。作成したソフトで、本例題の解析を行い、本論文で作成したソフトで、実際の構造設計が行えることが確かめられた。また、弾塑性解析を利用することにより、損傷部位の検証なども行うことも可能であることがわかった。

参考文献

- 1) 藤谷義信, 西村光正, 森村毅, 高松隆夫共著:「建築構造力学演習」, 培風館
- 2) 松本慎也著:「よくわかる構造力学の基本」, 秀和システム
- 3) 柴田明徳著:「最新耐震構造解析」, 森北出版株式会社