

モード適応型増分解析に関する基礎的検討

Basic Study on Modal Adaptive Pushover Analysis

平田 裕一 YUICHI HIRATA

構造設計ディビジョン 菅原 貴之 TAKAYUKI SUGAWARA

モード適応型増分解析は、増分過程において外力分布形を変化させる解析方法である。本解析の基本的な特性を把握することを目的として、鉄筋コンクリート造建物を対象とするパラメトリックスタディを実施した。本スタディでは、鉄筋コンクリート造建物の簡易タイプと立体骨組タイプを検討している。解析結果より、モード適応型増分解析では比例負荷の場合より層間変位が集中する傾向があること、また立体骨組タイプの場合、保有耐力が荷重増分方法によって異なることが示された。

キーワード：モード適応型増分解析, 比例負荷, 固有ベクトル, 等価粘性減衰定数, パラメトリックスタディ

Modal adaptive pushover analysis is the incremental analysis which changes the distribution of external forces in the incremental process. In order to understand the property of this analysis, parametric studies about RC buildings were carried out. Simple models and space frame models of RC buildings were studied. The result of this studies showed that the deformations in modal adaptive pushover analysis were larger than that ones in proportional loading at weak stories and that horizontal load-carrying capacity in each analysis was different in space frame models.

Key Words: Modal Adaptive Pushover Analysis, Proportional Loading, Eigenvector, Equivalent Damping Factor, Parametric Study

1. はじめに

構造物の性能設計を行うためには、構造物の耐力と弾塑性状態の変形量を適切に評価する必要がある。建物の弾塑性解析を行う方法として、一般に増分解析法が用いられる。標準的な増分解析では、地震時の応答特性に応じて静的外力分布を設定し、その外力分布を比例的に増加させる荷重増分法（以下、比例負荷と記す）を用いることが多い。建築構造物の耐力評価の場合、この外力分布として、建築基準法に示された A_i 分布が良く用いられている。

比例負荷は、増分過程において、外力分布の各点間の割合が変化しないことに特徴があり、構造物が全体的にバランスよく塑性化することが前提となっている。このため、構造体の塑性化の集中などによる外力分布の変化が考慮されない。比例負荷を用いた増分解析は、各振動モードに対応する弾塑性状態の変形量を評価する方法として、必ずしも十分ではないと考えられている。

近年、この問題に対して倉本ら¹⁾²⁾は、モード適応型

非線形荷重増分解析法（以下、MAP解析と記す）を提案した。また、このMAP解析を、性能設計法の代表的な方法である限界耐力計算の精度向上に用いている³⁾。

本論は、倉本らの提案するモード適応型の荷重増分法が、建物の耐力や層間変位に及ぼす影響を把握することを目的として、基本的なパラメトリックスタディを行うものである。パラメトリックスタディにおいて、建物各層の荷重変形曲線を直接設定する簡易タイプと標準的な板状集合住宅を想定した立体骨組タイプを取り上げる。各モデルに対して、それぞれ比例負荷とMAP解析を比較する。

2. 解析対象

本解析で対象とする構造物は、鉄筋コンクリート造集合住宅である。鉄筋コンクリート造集合住宅として、各層の荷重変形曲線を直接与える簡易タイプと標準的な板状集合住宅の立体骨組タイプの2つを検討している。

簡易タイプの荷重変形曲線は、鉄筋コンクリート造5

階建て、長辺45m×短辺14m、床重量12.74kN/m²、階高3mの集合住宅という設定からトリリニアモデルを作成した後、荷重変形曲線を滑らかにするため、履歴面積の等価なROモデル⁴⁾に置換することによって定めた。

トリリニアモデルの第2折れ点耐力は、必要保有水平耐力である。第2折れ点変位は層間変形角 R=1/200 である。第1折れ点耐力は、第2折れ点耐力の1/3とした。層の初期剛性は、必要保有水平耐力の分布形を仮定して、固有周期 T=0.02H=0.3秒 (H: 軒高15m) になるように、固有値解析から定めた。また第2折れ点以降の剛性は、初期剛性の1/100である。このトリリニアモデルを層間変形角 R=1/100の領域で面積が等価になるように、第2折れ点耐力までをROモデルを用い、第2折れ点耐力以降は、初期剛性の1/100の直線に置換している。

表-1に、解析に用いたROモデルの諸元を示す。ROモデルは、べき乗型の関数形によって荷重変形曲線を表すものである。表-1の脚注に示した関数のパラメーターである α 、 r の値によって特徴付けられる⁴⁾。

なお、本論では、上述の簡易タイプの復元力特性を標準モデルと呼称している。この標準モデルに対して、第1層の第2折れ点耐力を0.8倍にしたものを第1層弱モデル、第3層を0.8倍にしたものを第3層弱モデルとして、合わせて解析を行った。

立体骨組タイプは、長辺43.4m×短辺13m、階高3mの15階建ての板状集合住宅である。桁行き方向は純ラーメン構造であり、張間方向は戸境壁を耐震壁とした耐震壁付きラーメン構造である。今回のスタディでは、桁行き方向を解析対象として弾塑性解析を行っている。

図-1に平面図と立面図を示す。表-2は、代表的な柱と梁の主筋量である。配筋は、新耐震設計法を満足するように定めており、これを立体標準モデルとしている。この標準モデルに対して、1階柱と2階梁の主筋量を約70%に低減した1階柱2階梁弱モデルと7階柱と8階梁の主筋量を約70%に低減した7階柱8階梁弱モデルを検討した。

3. 解析方法

MAP解析として、増分解析の各ステップにおける変形量から直接的に荷重分布形を変化させる方法 (MAP解析1) と増分解析の各ステップにおける等価剛性を用いて固有値解析を行い、その固有ベクトルを用いる方法 (MAP解析2)の2つの方法がある²⁾。

簡易タイプに対しては、MAP解析1と2を、立体骨組タイプに対しては、MAP解析1を用いて解析した。

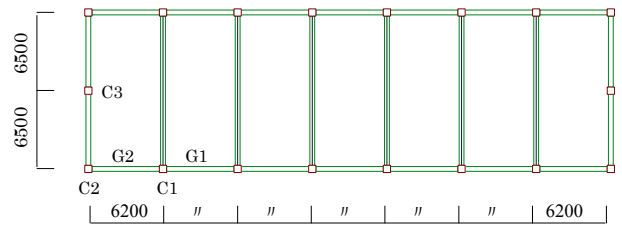
MAP解析における荷重増分は、ベースシアを増加さ

せることで制御され、ベースシアに応じて各階の外力が定まる。文献^{2),3)}によれば、各ステップの荷重分布は式(1)で与えられる。

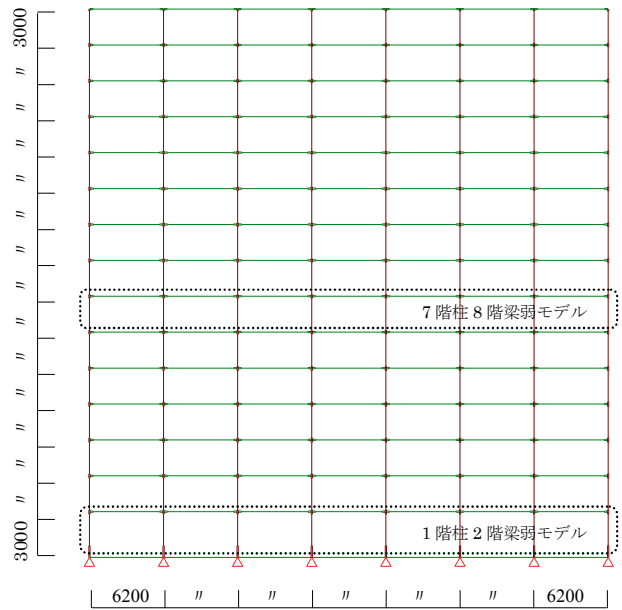
表-1 ROモデルの諸元 (簡易タイプ)

層	δa (cm)	Qa(kN)	α ¹⁾	r ¹⁾
5	0.212	3956	7.67	3
4	0.212	6612	7.67	3
3	0.212(0.17)	8800(7040)	7.67(9.80) ²⁾	3
2	0.212	10599	7.67	3
1	0.212(0.17)	12039(9631)	7.67(9.80) ²⁾	3

- 1) 第2折れ点耐力までROモデル $\delta/\delta_a = Q/Q_a + \alpha(Q/Q_a)^r$
第2折れ点耐力以降は初期剛性の1/100の直線
- 2) ()内は、弱層モデルの値



(1) 略平面図



(2) 略立面図

図-1 立体モデルの概要

表-2 立体モデルの配筋概要

標準モデル	1階柱2階梁			7階柱8階梁		
	C1 柱頭7,柱脚7 C2 柱頭7,柱脚7 C3 柱頭4,柱脚4 G1 上端7,下端7 G2 上端7,下端7	D38	SD490	C1 柱頭6,柱脚6 C2 柱頭6,柱脚6 C3 柱頭4,柱脚4 G1 上端7/2,下端7/2 G2 上端7/2,下端7/2	D35	SD490
1階柱2階梁弱モデル	C1 柱頭5,柱脚5 C2 柱頭5,柱脚5 C3 柱頭4,柱脚4 G1 上端5,下端5 G2 上端5,下端5	D38	SD490	標準モデルと同じ		
7階柱8階梁弱モデル	標準モデルと同じ			C1 柱頭4,柱脚4 C2 柱頭4,柱脚4 C3 柱頭4,柱脚4 G1 上端6,下端6 G2 上端6,下端6	D35	SD490

注1)梁主筋は、左端、右端共通
注2)*/*表示は、2段配筋の上段/下段を表す

$${}_1P_{i,k} = \frac{m_i \cdot {}_1\delta_{i,k-1}}{\sum_{j=1}^N m_j \cdot {}_1\delta_{j,k-1}} \cdot ({}_1Q_{B,k-1} + d_1 Q_B) \quad (1)$$

ここに、 ${}_1P_{i,k}$: 1次モードの*i*層の*k*ステップの荷重,
 m_i : *i*層の質量, ${}_1\delta_{i,k-1}$: 1次モードの*i*層の*k-1*ステップの相対変位,
 ${}_1Q_{B,k-1}$: 1次モードの*k-1*ステップのベースシア, $d_1 Q_B$: 1次モードのベースシアの増分

なお、比例負荷の場合は、Ai分布によって定まる荷重分布形を用いている。

4. 解析結果

図-2に、簡易タイプの標準モデルにおける各層の荷重変形曲線を示す。図-3は第1層弱モデルの場合、図-4は第3層弱モデルの場合である。各図中の破線は、荷重ステップの共通する点を結んでいる。図-2より、MAP解析1とMAP解析2はほぼ一致している。これはMAP解析1の変形モードが等価剛性による固有モードがよく対応したためと思われる。各ステップ毎に固有値解析を行わないMAP解析1でも、十分な精度で塑性化の影響が評価されている。MAP解析1、2と比例負荷の場合

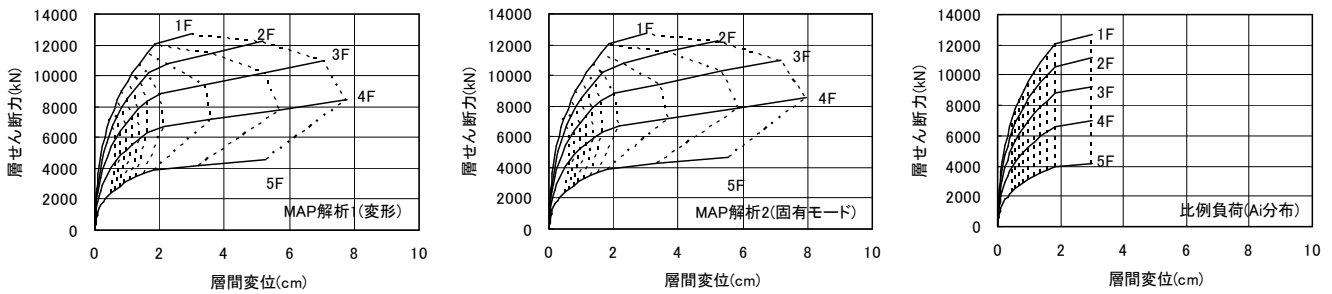


図-2 標準モデルの荷重変形曲線（簡易タイプの解析結果）

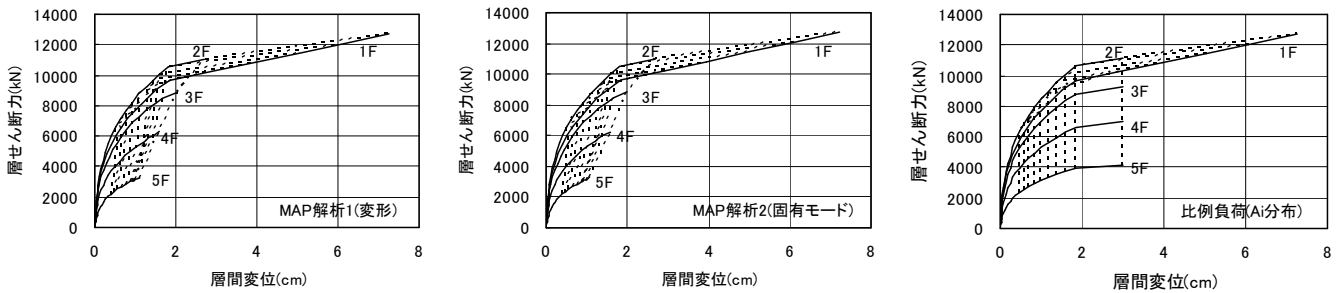


図-3 第1層弱モデルの荷重変形曲線（簡易タイプの解析結果）

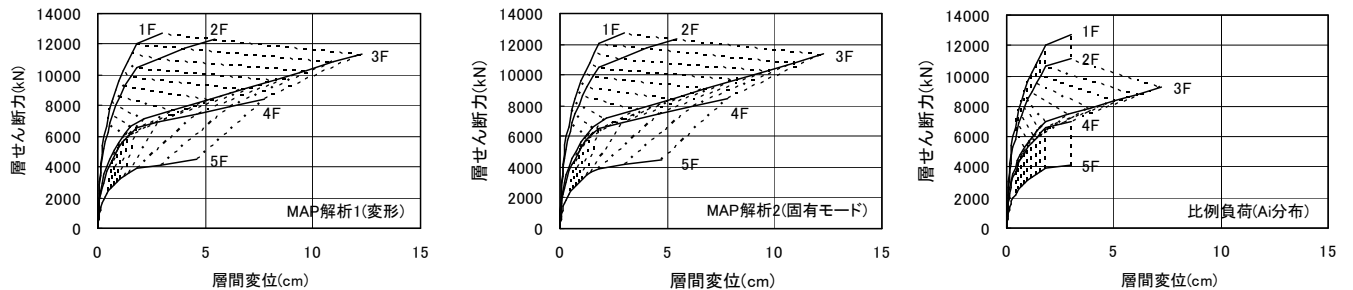


図-4 第3層弱モデルの荷重変形曲線（簡易タイプの解析結果）

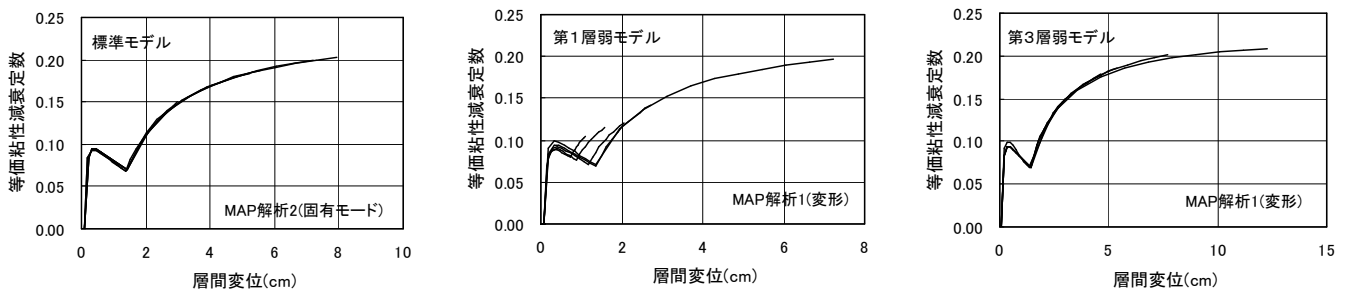


図-5 等価粘性減衰定数（簡易タイプ）

を比較すると、層間変位 1.5cm 以下では比較的対応するものの、それ以降から 3, 4 層の層間変位が顕著に増大した。これは MAP 解析では、式 (1) より構造体が塑性化するとそこを中心に荷重が集中する傾向があるためである。なお、比例負荷の場合では、各層の層間変位がほぼ同じ値である。これは、本モデルの耐力分布と剛性分布を Ai 分布から定めたので、荷重の分布と一致しているためと思われる。

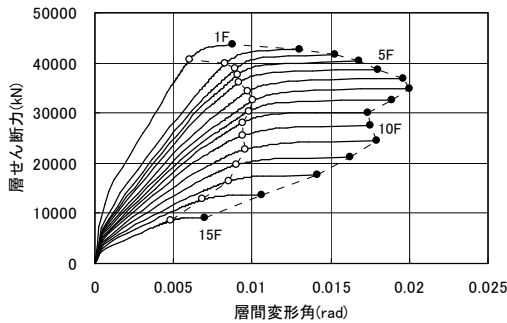
図-3より、第1層の解析結果である荷重変形曲線の形状は、いずれの解析法でも同じである。これに対して、第2層以上の層では MAP 解析の層間変位が小さい。これは弱層である第1層に荷重が集中すると相対的に上層部の荷重が小さくなることを表している。比例負荷の場合、第1層の荷重に対して上層の荷重の割合は常に一定

である。このため上層の変位量はこの割合に応じて増大している。

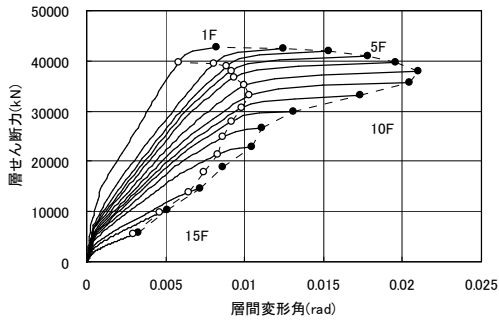
図-4より、第3層弱モデルでは各層において、MAP 解析の層間変位が比例負荷の層間変位より大きくなっていない。比例負荷の層間変位が大きくなるのは荷重を制御する第1層が弱層の場合に生じると考えられる。

解析結果の荷重変形曲線の最終 step までを、面積等価になるように改めてトリリニアモデルに設定し、このトリリニアモデルに対して、RC 造で多く用いられる復元力モデルである武田モデル ($\gamma = 0.4$) を履歴則とした場合の等価粘性減衰定数を図-5に各層を重ねて示す。

図より、標準モデルおよび第3層弱モデルは各層がほぼ同じ値である。層間変位が十分大きく、各層の RO モデルの係数が共通するためと思われる。これに対して、

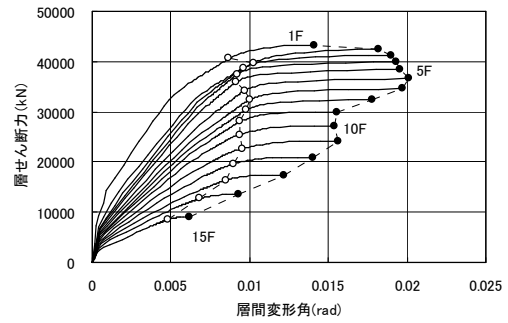


(1) 比例負荷

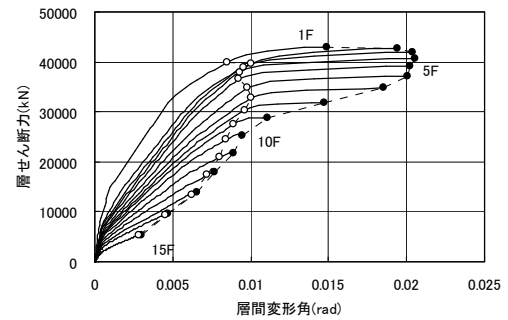


(2) MAP 解析

図-6 標準モデルの荷重変形曲線 (立体骨組)



(1) 比例負荷



(2) MAP 解析

図-7 1階柱2階梁弱モデルの荷重変形曲線 (立体骨組)

表-3 標準モデルの解析結果 (立体骨組)

層	立体標準モデル				耐力比
	比例負荷		MAP解析		
	耐力	層間変形角	耐力	層間変形角	
15	9183	0.0070	5695	0.0033	0.620
14	13693	0.0106	10221	0.0051	0.746
13	17605	0.0141	14590	0.0072	0.829
12	21150	0.0162	18789	0.0086	0.888
11	24404	0.0179	22784	0.0104	0.934
10	27415	0.0175	26541	0.0111	0.968
9	30150	0.0173	29972	0.0131	0.994
8	32627	0.0189	33051	0.0174	1.013
7	34871	0.0200	35722	0.0205	1.024
6	36884	0.0196	37916	0.0210	1.028
5	38700	0.0180	39664	0.0196	1.025
4	40281	0.0168	40968	0.0178	1.017
3	41634	0.0153	41868	0.0153	1.006
2	42761	0.0131	42406	0.0125	0.992
1	43667	0.0088	42628	0.0082	0.976

表-4 1階柱2階梁弱モデルの解析結果 (立体骨組)

層	1階柱2階梁弱モデル				耐力比
	比例負荷		MAP解析		
	耐力	層間変形角	耐力	層間変形角	
15	9105	0.0062	5377	0.0030	0.590
14	13577	0.0093	9661	0.0047	0.712
13	17456	0.0122	13815	0.0065	0.791
12	20971	0.0140	17835	0.0077	0.850
11	24198	0.0156	21694	0.0089	0.897
10	27184	0.0154	25373	0.0095	0.933
9	29895	0.0156	28789	0.0111	0.963
8	32351	0.0177	31921	0.0147	0.987
7	34576	0.0197	34727	0.0185	1.004
6	36572	0.0201	37137	0.0200	1.015
5	38372	0.0195	39168	0.0203	1.021
4	39940	0.0193	40777	0.0206	1.021
3	41281	0.0190	41960	0.0204	1.016
2	42399	0.0182	42714	0.0194	1.007
1	43298	0.0141	43047	0.0149	0.994

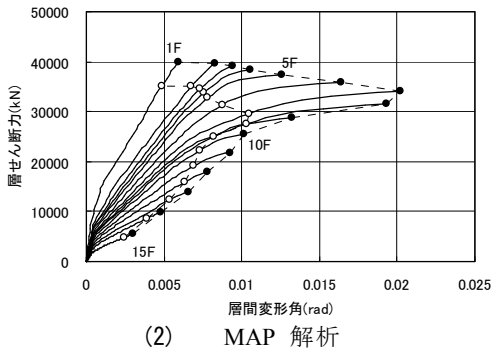
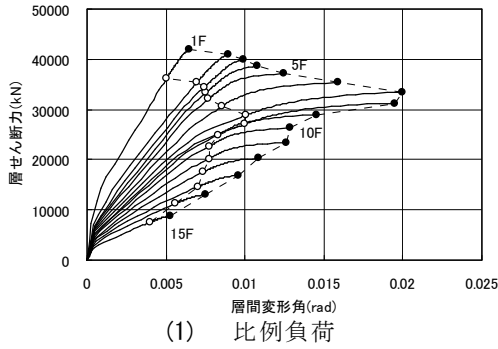


図-8 7階柱8階梁弱モデルの荷重変形曲線(立体骨組)

表-5 7階柱8階梁弱モデルの解析結果(立体骨組)

層	7階柱8階梁弱モデル				
	比例負荷		MAP解析		耐力比
	耐力	層間変形角	耐力	層間変形角	
15	8801	0.0052	5435	0.0030	0.618
14	13123	0.0075	9758	0.0048	0.744
13	16873	0.0095	13935	0.0066	0.826
12	20270	0.0109	17956	0.0078	0.886
11	23389	0.0126	21789	0.0092	0.932
10	26275	0.0129	25409	0.0102	0.967
9	28896	0.0146	28723	0.0132	0.994
8	31270	0.0195	31660	0.0193	1.012
7	33421	0.0200	34074	0.0202	1.020
6	35350	0.0159	35935	0.0164	1.017
5	37090	0.0124	37381	0.0126	1.008
4	38606	0.0108	38471	0.0106	0.996
3	39902	0.0099	39239	0.0094	0.983
2	40983	0.0090	39704	0.0083	0.969
1	41851	0.0065	39899	0.0059	0.953

第1層弱モデルでは各層に若干差がある。これは上層の変位が小さいため、トリリニアの第3剛性に差が生じたことによる影響と思われる。

図-6～図-8に立体骨組タイプの荷重変形曲線を、表-3～表-5に各荷重変形曲線の最終stepの層せん断力と層間変形角を示す。図-6と表-3が立体標準モデル、図-7と表-4が1階柱2階梁弱モデル、図-8と表-5が、階柱8階梁弱モデルの解析結果である。図中の(1)は、比例負荷の場合であり、(2)はMAP解析の場合である。解析は、どこかの層が層間変形角 $R=1/50$ になった時点で終了している。

図-6と表-3より、比例負荷では、3階から12階の層間変形角が解析の最終stepで $R=1/75$ を超えている。これに

対して、MAP解析の場合は、3階から8階の層間変形角が解析の最終stepで $R=1/75$ を超えている。MAP解析を行う場合、特定層に変形が集中する傾向が見られる。

表-3より、比例負荷の最終step層せん断力とMAP解析のものでは、両解析方法において最終stepが $R=1/75$ を超えた3階から8階では比較的よい対応を示している。これに対して、最上層では、MAP解析の耐力は、比例負荷の場合の6割程度に評価される。これは、本解析の解析終了条件をどこかの層が最大層間変形角 $R=1/50$ となることとしているためであり、その時点での両解析方法の各層の層間変形角の差に対応すると思われる。

図-7と表-4より、1階柱2階梁弱モデルでは、1階から12階までの12層が解析の最終stepで $R=1/75$ を超えている。これに対して、MAP解析の場合は、1階から8階までの8層が解析の最終stepで $R=1/75$ を超えている。このため、8階以下において最大耐力の評価がよく対応している。9階より上階における耐力比の値は、標準モデルの場合より小さい。

図-8と表-5より、7階柱8階梁弱モデルでは、6階から9階までの4層が解析の最終stepで $R=1/75$ を超えている。これに対して、MAP解析の場合は、6階から8階までの3層が解析の最終stepで $R=1/75$ を超えている。

MAP解析では、変形が集中する層に外力を集中する。このため、最大耐力を指定した層間変形角に到達した点の層せん断力として定める場合、弱層が存在する位置に応じて耐力分布が大きく変化することがわかる。

5. まとめ

弾塑性解析の荷重増分法として、MAP解析と比例負荷解析を異なる建物モデルに対して行った。解析結果より、以下のことを確認した。

- ① MAP解析において解析時の変形を用いる方法(MAP解析1)と等価剛性による固有ベクトルを用いる方法(MAP解析2)はよく一致した。
- ②ベースシアを一致させる解析を行った簡易タイプの場合、MAP解析では塑性化する箇所の変位が比例負荷の場合より大きくなった。
- ③簡易タイプの場合、荷重増分を制御する第1層が弱層になる場合、上層の変位が比例負荷の場合より小さくなる場合がある。
- ④最大層間変形角を一致させる解析を行った立体骨組タイプの場合、MAP解析により、層間変形角が弱層に集中し、生じ方が大きく異なる。
- ⑤ある層の層間変形角で耐力を規定する場合、MAP

解析により最大耐力に差が生じる。本スタディでは、MAP 解析における上層階の耐力が、比例負荷の耐力より小さく評価された。

現状の増分解析で多く用いられる比例負荷は、塑性化が進む層の変形量を過小評価する場合がある。このことは、変形量で層の保有耐力を定める場合に大きな影響を受ける。MAP 解析を用いて塑性化の進展状況を適切に評価することにより、構造物の合理的な耐力評価が可能になると考えられる。

謝辞

本研究を進めるに当たり、ユニオンシステム(株)山崎久雄氏に多大な協力をいただきました。ここに記し、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 倉本他：多層建築物の等価1自由度系縮約法と地震応答予測精度，日本建築学会構造系論文集，第546号，pp.79-85，2001.8
- 2) 倉本：多層建築物における等価1自由度系の地震応答特性と高次モード応答の予測，日本建築学会構造系論文集，第580号，pp.61-68，2004.6
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の等価線形化法を用いた耐震性能評価法，pp43-48，PD資料，2013.8
- 4) 柴田：最新耐震構造解析，最新建築学シリーズ9，森北出版，116pp，1981.6