

スペースフレームの3次元解析システムの拡張と応用

鉄筋コンクリート部材の弾塑性解析機能の組み込みと検証

INTEGRATION AND APPLICATION FOR THE 3-D FRAME ANALYSIS SYSTEM

Inclusion and verification of elasto-plastic analysis function for RC members

武藤厚*, 前田大介**, 梶原由貴***, 村田賢*

Atsushi MUTOH, Daisuke MAEDA, Yuki KAJIHARA and Masaru MURATA

"SPACE" System mainly efficiently enabled the geometrically nonlinear analysis of steel frame, and it was developed by the authors. This system increases the user as a system with convenient GUI function and high-speed CG function. Recently, elasto-plastic analysis function for the reinforced concrete structure was built in, and the system was expanded. The purpose of this report is to show outline of the modeling of the RC structure and verification of the validity, while the new functions of the system are introduced. In this paper, it is modeled using the system for RC building which the literature showed, and the results of trying static and dynamic elasto-plastic analyses are shown.

Keywords : Structural analysis system, Elasto-plastic analysis, Reinforced concrete structures, Frame analysis

構造解析システム、弾塑性解析、鉄筋コンクリート構造、骨組解析

1. はじめに

主として空間骨組構造の数値解析の教育用に公開されているシステム"SPACE"¹⁾は、当初、主として鉄骨骨組を対象としてGUIベースのプリ・ポスト処理機能を有し、公開されている。近年、そのシステムについて、鉄筋コンクリート構造に対する弾塑性機能を組み込み、システムの拡張を行った。本報告の目的は、システムの新規機能を紹介すると共に、RC 構造物のモデル化の概要と妥当性の検証について示すことにある。例として既往の文献²⁾で示されたRC 建物を対象として、開発されたシステムを用いてモデル化し、静的および動的な弾塑性解析を試みる。比較対象が数値解析ではあるが、得られた結果と比較し、RC 構造の弾塑性解析機能の妥当性を検証する。

2. システムの概要

2.1 全体システム

SPACE は、図 1 に示すようにデータベースを中心に各種解析やプレポスト等の各モジュールが有機的に結合され構成される。ここでは、人口地震波を作ることも可能で、記録された実地震波と同様データベースに登録し、使用することができる。MODELER では、

CAD による解析モデルの構築を可能とし、材料や断面特性などの情報をデータベース化して、入力操作の利便性を大幅に向上させている。例えば RC のファイバー断面では、要素に必要な情報を効率良く作り出す。

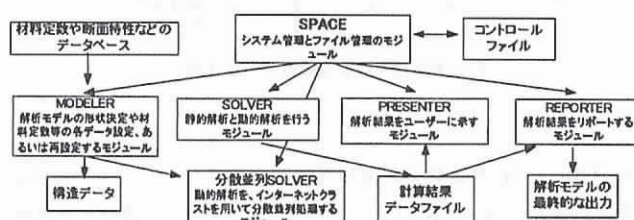


図1 システム構成

利用者の視点で概観すると、まず、構造物の基本的な形状をダイアログより入力し、通り心位置や座標の初期設定を行って図面の原型を生成する。次に、部材設定、境界条件、荷重位置、質量などの情報が、平面図や立面図上の位置をマウスで指定することで自動的に作成される。操作終了後、それらはファイルに出力される。SOLVER では、解析用制御パラメータに基づいて数値計算を実施し、

*名城大学理工学部建築学科 教授・工博

**株式会社飯島建築事務所 工修

***株式会社エスパス建築事務所 工修

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Meijo Univ., Dr. Eng.

IJIMA Structural Design Office

ESPACE AO

関連するファイルに結果を出力する。PRESENTER によって解析結果が分析・評価される。アニメーションによって変位や荷重の増分履歴や時刻歴応答が、M 図付きの軸組ワイヤフレームとして観察される。応力はカラー表示され、塑性ヒンジ発生位置にはマーカが表示される。さらに、構造をソリッド表示することで振動状態がよりリアルに表現される。ソリッド表示機能の一つに、物体内部を透視するオプションがある。そこでは各部材内に RC 断面の配筋状態やばねが表示され、アニメーション機能を用いると断面内の応力状態や塑性進行状態が可視化される。また、骨組中の部材をマウスで指定すると、ファイバー断面の応力状態、各ファイバーやばねの応力-歪関係や力-変位関係が容易に得られ、部材の弾塑性状態が即座に理解できる。REPORTER では、解析結果を分析し、研究・設計で必要となる表やグラフを提供する。

2.2 MODELER による解析データ作成

解析で必要となる各種のデータは、MODELER を用いて作成される。図 2 に示すように平面図や立面図を使用し、マウスで位置を指定して部材などの設定を行う。また、節点や部材に関する情報は表形式で設定・変更することができる。

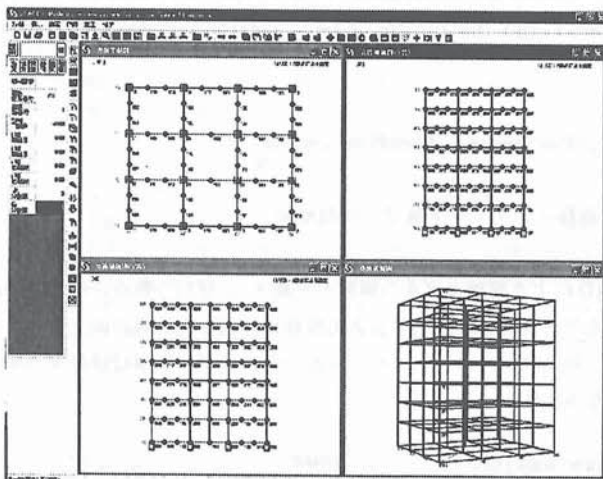


図 2 MODELER による構造データ作成

SPACE は、材料定数や断面特性に関するデータベースを有している。MODELER ではこのデータベースを利用して部材の断面性能やファイバー断面を設定しており、解析モデルの効率的な構築に貢献している。特に、部材情報や断面データの作成は図 3 のようなダイアログを用いて行うため、分かり易くデータ入力が容易となる。また図 2 右下の透視図をソリッド表示に変更した後、透視表示にすると、図 4 のように断面内の配筋状態が示され、不適切な設定の検索に役立つことになる。

このように MODELER は、使い易く、しかも効率的に解析モデルを構築することが可能であり、SPACE における重要な役割を担っている。

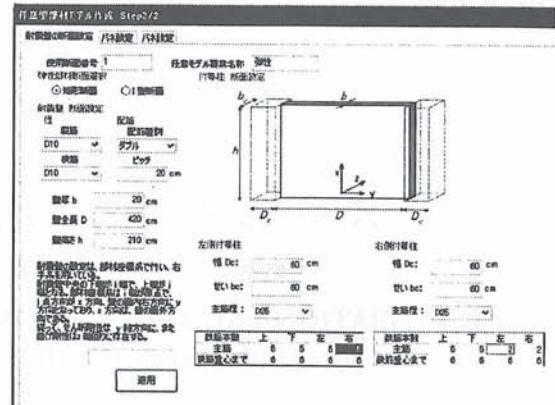


図 3 ダイアログを用いた耐震壁の設定

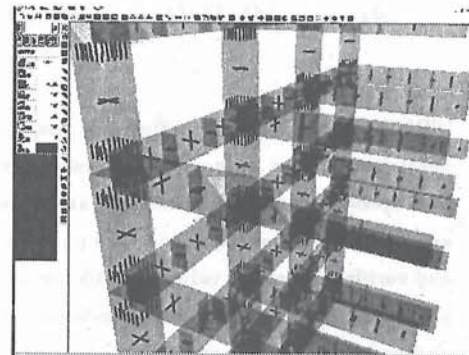


図 4 ソリッド表示で断面内の配筋状態を確認

2.3 SOLVER による数値解析

SPACE には、増分理論を基に幾何学的非線形を考慮した静的・動的弾塑性解析用 SOLVER 及び分散並列型動的 SOLVER の 3 種類が存在する。これら 3 種の静的及び動的解析モジュールは、いずれも GUI を管理するグラフィック関連部分と数値計算を行う部分に分かれている。

図 5 は動的 SOLVER の計算過程や構造物の変形状態を表している。図のようにこれらのモジュールは数値計算を実施しながら図形処理を行い、またマウス操作などを介して送られるユーザからのメッセージを受け、その対応処理を実行する。例えば、計算を途中で中止したり、新たな図形用ウィンドウを表示させたりする。このような複雑な処理を行うためには、通常の数値計算手法のみでは実現できず、マルチスレッド技術や図形処理技術を応用している。

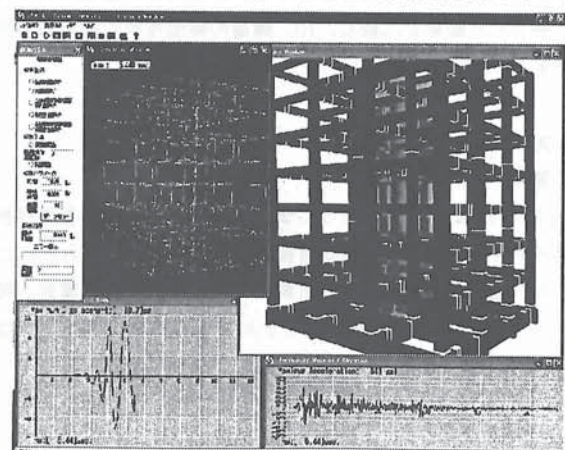


図 5 動的 SOLVER の計算過程を表示する

鉄筋コンクリート構造にファイバー断面を適用するためには、多くの計算時間と膨大なメモリー容量を必要とする。RC 断面のファイバー数は、既定では 12x12 に分割され、これに鉄筋を加えた数となる。無論、この分割方法は変更可能であるが、解析精度を維持するためには、多くのファイバーと計算時間が必要となる。そのため、SPACE には、計算効率を上げるために、分散並列型の動的 SOLVER が付属している。この分散並列処理は、単一 CPU で動的解析を行う手法を並列処理向きに変更したものであり、部材モデルや履歴モデルは全て同一である。分散並列処理の実施には特殊な並列用コンピュータを必要とせず、インターネット上の PC をクラスターとしてまとめ、数値計算の効率化を図っている。クラスターの構築は容易であり、特に PC 内に複数 CPU がある場合は、図 6 のように簡単な手続きで構築することができる。解析構造の大規模化とファイバー断面の細分化に備えて、SPACE では並列処理が容易に実施できる環境を提供している（詳細は文献²⁾ URL を参照）。

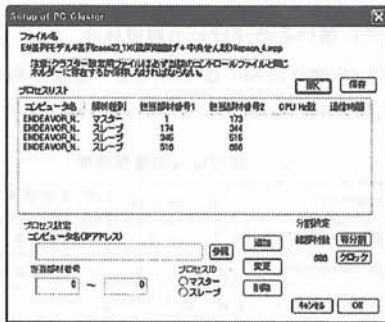


図 6 分散並列処理用 PC クラスターの構築

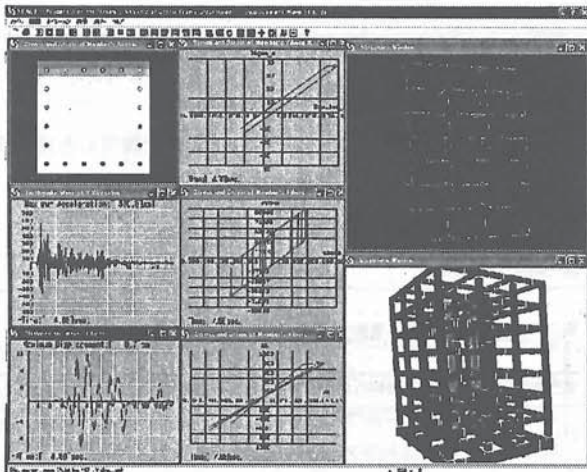


図 7 PRESENTER による解析結果の分析

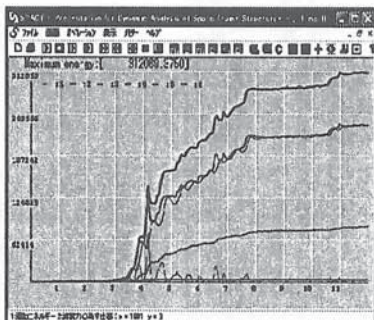


図 8 時間共に変化する各エネルギー

2.4 PRESENTER による結果の分析

解析結果は PRESENTER を用いて分析される。PRESENTER には多くのツールが用意されており、構造物全体の変形状態から断面内のコンクリートや鉄筋の応力-歪関係まで図形やグラフとして提示される。これらのツールを利用して、構造物の保有耐力や動特性を評価することになる。図 7 には、RC 構造の動的解析結果が示され、軸組の曲げモーメント図や鉄筋の応力が色で表示されている。また、部材をマウスで指定すると、RC 断面が他のウィンドウに表示され、さらに、その中の任意のファイバーを指定すると、これも他のウィンドウに応力-歪関係が示される。アニメーションを利用すると、時間と共に構造物の変形状態、断面の応力状態、ばねやファイバー応力の変化が観察されることになる。

PRESENTER のツールのひとつに、図 8 に示すエネルギー表示がある。ここでは、時間と共に変化する各エネルギー（地震の為す入力エネルギー、運動エネルギー、減衰力の為す仕事、構造物に蓄えられる歪エネルギーなど）の推移が描かれている。また図 9 には、骨組第 1 層と 2 層の層せん断力と層間変位の履歴が描かれており、これらから骨組全体の耐力や動的挙動が分析される。その他にも有用なツールが多数用意されており、これらの利用することで骨組の静的・動的特性を評価する。

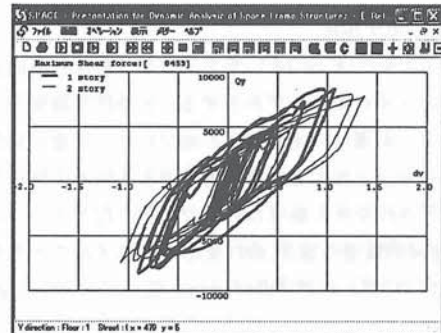


図 9 層せん断力と層間変位 (1 層-2 層)

3. 鉄筋コンクリート部材のモデル化^{5), 6)}

3.1 梁・柱のモデル化

一般的な梁モデルとして材端剛塑性ばね(図 10(b))が用いられることが多いが、ここでは梁モデルとして、図 10(a)に示す両端ファイバーモデルも用意される。このモデルでは曲げと軸力の連成効果が自動的に考慮されている。

柱のモデルは、梁モデル同様、材端はファイバーモデルとし、中央にせん断破壊を考慮するばねを配したモデル(図 10(c))とする。

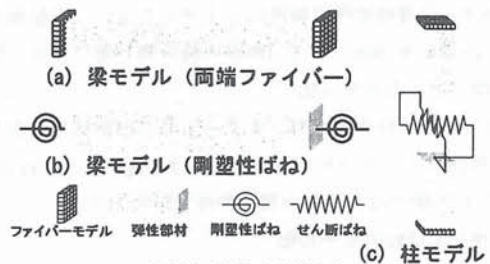


図 10 部材のモデル化

3.2 ファイバー要素の応力-ひずみ関係

鉄筋コンクリート断面は基本的にファイバー要素としてモデル化し、各ファイバーで独立した1軸応力-歪関係が用いられる。ただし、断面内の歪は平面保持の仮定より求められる。

コンクリートの履歴特性として、図11のようにせん断補強筋で拘束を受けるコアコンクリートとかぶり部分のシェルコンクリートに分けて設定することができる。本来、コンクリートの履歴特性は骨格曲線にほとんど直線部分がなく、非線形処理が必要であるが、ここでは、近似的に効率よく模擬できる直線コンクリート型を採用する(引張側は引張強度でテンションスティフニングを考慮、繰返しについては、弾性の除荷・再載荷)。なお、鉄筋の履歴特性は図12に示す対称のパイリニア型とする。

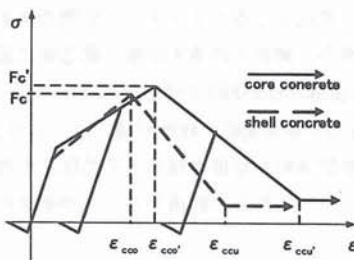


図11 コンクリートの履歴特性

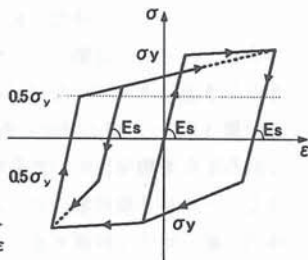


図12 鉄筋の履歴特性

3.3 耐震壁のモデル化

耐震壁のモデル化は、図13に示すような付帯柱と壁部分を各々線材に置換した3本柱要素モデルとする。付帯柱の断面をファイバーに設定すると、耐震壁の面外方向が純フレーム構造の場合、付帯柱はその方向の曲げと軸力を同時に考慮できる利点を持つことになる。耐震壁のモデル化をせん断ばねのみでモデル化するケースが多く見られるが、連層耐震壁の場合、曲げ変形が卓越することを考慮して、SPACEでは壁脚部と頂部に曲げばねを配してモデル化を行う。

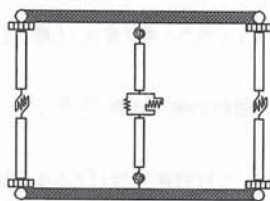


図13 耐震壁のモデル化

3.4 柱・梁、耐震壁で使用する各ばねの履歴特性

ここでは、現時点での一般的な履歴特性をモデル化して組み込む。

3.4.1 軸ばねのモデル化

軸方向ばねの履歴特性は弾性除荷モデルを用い、引張側をパイリニア型、圧縮側を弾性とする(鉄筋の抜け出し等の再現に用いる)。

3.4.2 曲げばねのモデル化

曲げばねの履歴特性は、コンクリートのひび割れと鉄筋の降伏を考慮し、部材のモーメント-回転角関係はDegrading-Tri-linear(図14(a))とし、梁では非対称の履歴特性を持つとする。

3.4.3 せん断ばねのモデル化

せん断ばねの履歴特性は、エネルギー吸収が小さく、また、耐力

低下を表すために原点指向型(図14(b))とする。

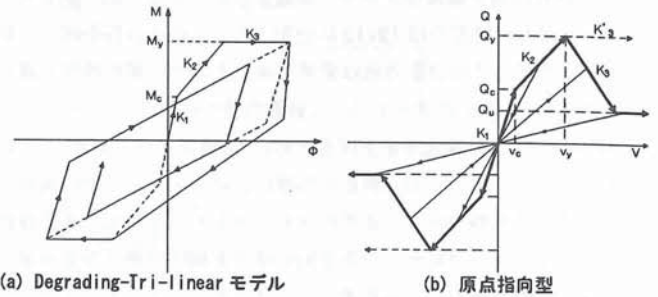


図14 各ばねの履歴特性

3.5 ばねの終局強度

ばねの終局強度式は、SPACEが内蔵している式から利用者が選択することになる。以下にその一部を示す。なお、せん断終局強度等に関する実験式の解析上の扱いについては、文献⁶⁾を参照されたい。

3.5.1 耐震壁に用いる曲げばねの履歴特性

耐震壁で用いる曲げばねの履歴特性は、前章で説明した梁と同様でDegrading-Tri-linearとし、表1に履歴特性値の算定式を示す。

表1 曲げばねの履歴特性

第一剛性(初期剛性)	$K_1 = 4EI/h$	ばねを剛塑性としているため、 K_1 を100倍した値とする。
第二剛性(曲げひび割れ後剛性)	$K_2 = a_1 \cdot K_1$	$a_1 = 0.1$: SPACEの既定値
第三剛性(曲げ降伏後剛性)	$K_3 = a_2 \cdot K_1$	$a_2 = 0.001$: SPACEの既定値
曲げひび割れモーメント	$M_c = (1/3) \cdot M_y$	
曲げ降伏モーメント	$M_{y1} = 0.9a_1 \cdot \sigma_y \cdot D + 0.4a_2 \cdot \sigma_{wy} \cdot D + 0.5N \cdot D \left(1 - \frac{N}{B_c \cdot D \cdot F_c}\right)$ $M_{y2} = a_1 \cdot \sigma_y \cdot l_v + 0.5a_2 \cdot \sigma_{wy} \cdot l_v + 0.5N \cdot l_v$	

3.5.2 耐震壁に用いるせん断ばねの履歴特性

曲げばね同様、せん断ばねの履歴特性は前章で説明した原点指向型とし、表2に履歴特性値の算定方法を示す。

表2 せん断ばねの履歴特性

第一剛性(初期剛性)	$K_1 = GA/1.2h$	
第二剛性(せん断ひび割れ後剛性)	$K_2 = b_1 \cdot K_1$	$b_1 = 0.1$: SPACEの既定値
	$K_2 = \frac{Q_y - Q_c}{v_y - v_c}$	$v = 0.004$: SPACEの既定値
第三剛性(限界せん断力後剛性)	$K_3 = b_2 \cdot K_1$	$b_2 = -0.05$: SPACEの既定値
ひび割れせん断耐力	$Q_c = (1/2) \cdot Q_y$ $Q_c = (0.043 p_c + 0.051) \sigma_B \cdot A_c$	
せん断終局耐力(修正大野・荒川式)	$Q_y = \left\{ \frac{0.068 p_{cc}^{0.23} (F_c + 18)}{\sqrt{M/(QD) + 0.12}} + 0.85 \sqrt{p_{cc} \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_o \right\} b_c j$	
残存せん断耐力	$Q_u = 0.3 \cdot Q_y$	$\approx 1 \leq M/(Q \cdot D) = 1/(2D) \leq 3$

4. 比較解析事例

4.1 RC部材のモデル化

表3には今西らにより^{3),4)}、既往の文献で紹介された比較解析例における部材モデルの概要及び、本解析における部材のモデル化の概要を示す。文献では多くのケースで架構は3次元となっており、梁モデルは材端剛塑性ばね、柱は軸力を考慮した曲げばね、耐震壁は3本柱要素モデルを用いている。一方、本解析では先に示した部材モデルが用いられ、梁モデルの違いで2種の解析ケースがある。

表3 文献におけるRC部材のモデル化の概要^{3),4)}

	文献3)における部材のモデル化(全13ケース)	SPACEにおける部材のモデル化
架構モデル	3次元 (9ケース)	3次元
はりモデル	材端剛塑性ばね (11ケース)	材端曲げばねモデル(CASE1) 材端ファイバーモデル(CASE2)
柱モデル	塑性論モデル (10ケース)	材端ファイバー+せん断ばね
耐震壁モデル	3柱要素モデル 10ケース)	3柱要素モデル

4.2 解析対象モデルの概要^{3),4)}

解析モデルは、整形な鉄筋コンクリート造の7階建て事務所ビルであり、図15にその建物の概要を示す。この建物は、桁行方向が耐震壁付きフレーム構造、はり間方向が純フレーム構造となっている。また、図16に1階の代表的な部材の配筋状態を示す。同図(a)には梁、(b)には柱、(c)には耐震壁に関する配筋状態が示されている。なお、本解析では文献の解析条件と同一とするため、鉄筋の第二剛性を0とする。

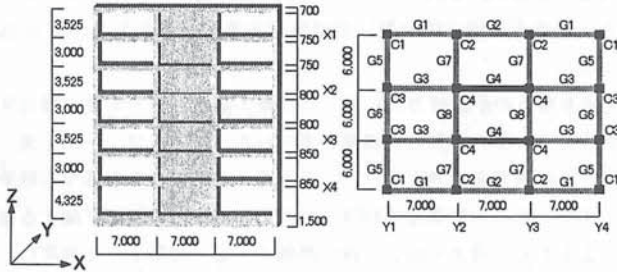


図15 対象建物の概要

1階	G1~G8	1階	C1,C3,C4	C2	1階	SW20
断面(mm)	500*1500	断面(mm)	850*850	850*850	断面(mm)	20*815
配筋	5-D29	配筋	18-D29	20-D29	配筋	2-D13@200
断面図		断面図			断面図	

(a) 梁の配筋 (b) 柱の配筋 (c) 壁の配筋

※1 1階のコンクリート強度をFc27とする。
 ※2 主筋をSD345、壁配筋及びせん断補強筋をSD295とする。

図16では、文献を基にした長期及び短期荷重の載荷方法について示す。長期荷重として、同図(a)に示す負担面積分の固定+積載鉛直荷重が、(b)に示すように梁3分割の各節点に分散させて載荷される。ただし、耐震壁に付帯する梁では、2分割の節点に載荷する。水平荷重は、表4(c)に示すように、文献による一次設計用層せん断力より算定され、同図(d)に示すように柱頭に分散して加えられる。また、境界条件は文献より下端部をピン支持とする。

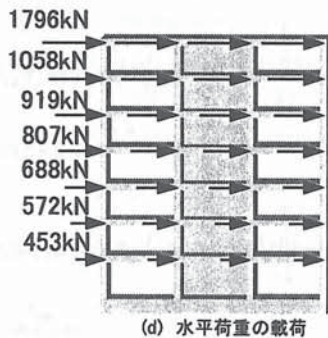


図16 各部材の配筋の設定

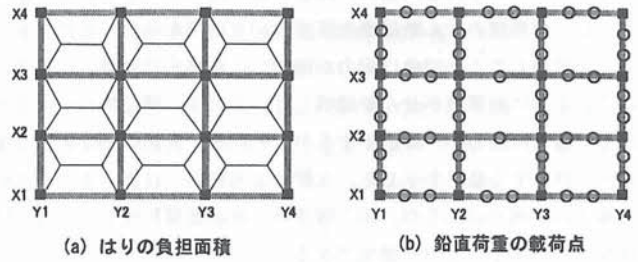


図17 積載荷重の設定

表4 一次設計用地震荷重の設定

h=25.1m, T=0.502秒, Z=1.00, Rt=1.00, C0=0.20

階	W(kN)	Σ	α	Ai	Ci	Qi(kN)	wi(kN/m ²)
7	4482.5	4482.5	0.14	2.00	0.40	1796.3	11.9
6	4135.6	8618.1	0.27	1.66	0.33	2853.8	11.0
5	4295.3	12913.4	0.41	1.46	0.29	3773.0	11.4
4	4462.9	17376.3	0.55	1.32	0.26	4579.5	11.8
3	4568.8	21945.1	0.70	1.20	0.24	5267.5	12.1
2	4689.3	26634.4	0.85	1.10	0.22	5839.8	12.2
1	4829.4	31463.8	1.00	1.00	0.20	6292.6	12.7

以下に、文献中に示された解析結果の概要を示す。

- ・耐震壁方向で、13 ケース中 1 ケースに耐震壁にせん断破壊が生じたが、その他は曲げ先行型破壊を示す。
- ・耐震壁方向で、層せん断力-層間変位の関係は、変形が進むにつれてばらつきが大きくなっている。
- ・フレーム方向では、耐震壁方向に比べ、層せん断力-層間変位の関係はばらつきが少なく、最終耐力もほぼ一致している。

5. 静的解析結果と文献との比較

ここでは、静的弾塑性解析として、まず荷重増分法により長期荷重を載荷した後、変位増分法で短期荷重時の応力解析を行う(代表的な階の水平変位をパラメータとして選定した変位増分による)。表5には、数値計算を行った2種の解析ケースを示す。

図18には、耐震壁方向及びフレーム方向に関する最下層の層せん断力-層間変位関係が各々示される。文献の結果では両方向共に、建物全体の崩壊は、各階における梁降伏先行型で、最終的に一階の柱脚部の曲げ降伏によって生じている。文献での各プログラムには、モデル化や解析手法の差異が大きく、そのため耐震壁方向の結果には比較的大きなばらつきが見られる。

図18(b)のフレーム方向の解析CASE1では、破壊のメカニズムやその過程と崩壊挙動に至るまで、文献とほぼ同様の結果を得た。ただし、CASE2の耐力が文献やCASE1と比べ、かなり高くなっており、その要因として梁にファイバーを用いたモデルでは、圧縮軸力による曲げ耐力の増加が挙げられる。特に、剛床仮定では部材両端で図心が拘束され、その結果さらに圧縮軸力が増え、曲げ耐力を増加させる。梁の曲げ耐力が増加したことによって、骨組全体に及ぶ崩壊メカニズムの形成が遅れ、崩壊荷重が増加する。このように梁にファイバー断面を使用する際は、曲げ耐力を増加させる要因である荷重位置や剛床仮定などについて十分な注意が必要である。

図18(a)の耐震壁方向の解析結果CASE1では、崩壊メカニズムは文献と同様に耐震壁の曲げ降伏先行型で剛性を低下させ、最下層柱脚部の降伏で全体崩壊に至るといった結果を得た。一方、CASE2

では、フレーム方向と同様に、比較対象に比べて大きな耐力・剛性を示し、耐震壁のせん断破壊先行型という結果を得た。梁にファイバーを使用したことで曲げ耐力が増加し、結果全体崩壊メカニズムが生じる前に耐震壁がせん断破壊した。その後、構造物が不安定となって層せん断力が一時低下するが、その後、骨組の剛性によって耐力を維持する結果を示した。文献による結果とは異なるが、数値計算上の一例ではあるが、RC 構造物の破壊進展状況としては可能性を否定出来ないものと推測できる。

表5 解析ケース

	CASE1	CASE2
はりモデル	材端剛塑性ばね	材端ファイバー
床の考慮方法	剛床仮定	剛床仮定

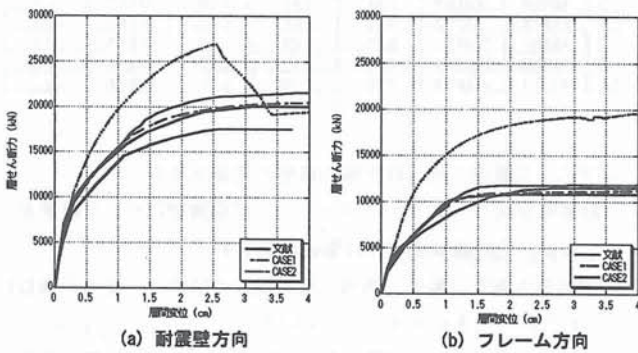


図18 層せん断力-層間変位関係

6. 動的解析

6.1 解析モデル

既往の比較に関する文献では⁴⁾、質点系地震応答の結果が示されているが、ここでは質点系と骨組系の地震応答解析を実施し、文献の結果と共に両者の結果を比較・検討する。解析モデルは静的解析で文献に比較的近い結果が得られた CASE1 とし、減衰はレーリー型と剛性比例型の2種を用いる。

6.2 解析条件

ここでは、まず静的鉛直荷重を加えた後、その後 El-Centro-NS を入力し地震応答解析を行う。表6に文献における解析条件及び本解析での解析条件を示す。なお、文献中の詳細な解析条件は静的解析同様、解析者の判断に委ねられているため、結果にばらつきが見られる。

表6 解析条件

	文献 4)	SPACE
解析モデル	質点系モデル	骨組系・質点系モデル
減種類	剛性比例型 ^{※1}	剛性比例型・レーリー型
減減衰定数	3%	3%
地種類	El-Centro-NS	El-Centro-NS
震最大入力速度	50 cm/sec	50 cm/sec
波最大入力加速度	510.8 cm/sec ²	510.8 cm/sec ²
時間間隔	0.005sec ^{※2}	0.001sec
時間積分法	Newmark β 法 ($\beta=1/4$) ^{※3}	Newmark β 法 ($\beta=1/4$)

※1 減衰は12ケース中10ケースが初期剛性比例型、他のケースは瞬間剛性比例型。
 ※2 時間間隔は12ケース中10ケースが0.005sec、他のケースは0.001sec、0.010sec。
 ※3 時間積分法は12ケース中10ケースがNewmark β 法 ($\beta=1/4$)、他のケースは $\beta=1/6$ 。

6.3 固有周期と応答解析結果

表7には固有値解析結果を、また図19には耐震壁方向の骨組系地震応答解析(レーリー型)における最上階の時刻歴応答を示す。同図の応答加速度、応答速度、応答変位の最大値は、各々955cm/s²、85cm/s、9.6cmである。なお、応答波形に片寄りや残留変位は見られない。

表7によると骨組モデルの1次固有周期は耐震壁方向で0.374秒、フレーム方向で0.461秒となり文献とほぼ同一の結果を得た。しかし、他の次数では両方向共に多少小さい値となった。一方、質点系モデルでは、いずれも文献に示されている結果と同等の値となっている。

図20には、骨組系の解析結果を最大応答加速度、最大応答層間変形角、最大応答せん断力係数について文献との比較を各々示す。文献での値は、各プログラムで解析条件や骨格曲線、履歴特性の差異が大きく、結果として評価もばらついている。図中の文献のグラフは、初期剛性比例型減衰を用いた解析の最大値と最小値をプロットしたものである。なお、フレーム方向の最大応答層間変形角には、求めた質点系(剛性比例型)の結果が参考までに示されている(図20(d))。

骨組系解析の耐震壁方向に関しては最大層せん断力や最大層間変形角などは文献と類似した結果が得られた。一方、フレーム方向では全体的に層間変形角が小さく、また高さ方向の分布も異なる結果を示すが、耐力や損傷後の剛性・断面力の再配分の評価に関する差異によるものと考えられ、今後の課題である(付録1, 2参照)。

減衰に関しては、レーリー型を用いたケースの層間変形角は、剛性比例型を用いたケースに比べ、大きくなっている。これは、2次モードにおける減衰定数が小さいことに起因すると考えられる。

表7 固有値解析結果 [sec]

	X方向(耐震壁方向)			Y方向(フレーム方向)		
	文献	骨組モデル	質点系モデル	文献	骨組モデル	質点系モデル
1次	0.32~0.39	0.37	0.38	0.45~0.50	0.46	0.46
2次	0.13~0.16	0.12	0.15	0.18~0.21	0.17	0.18
3次	0.083~0.103	0.063	0.095	0.111~0.131	0.093	0.114

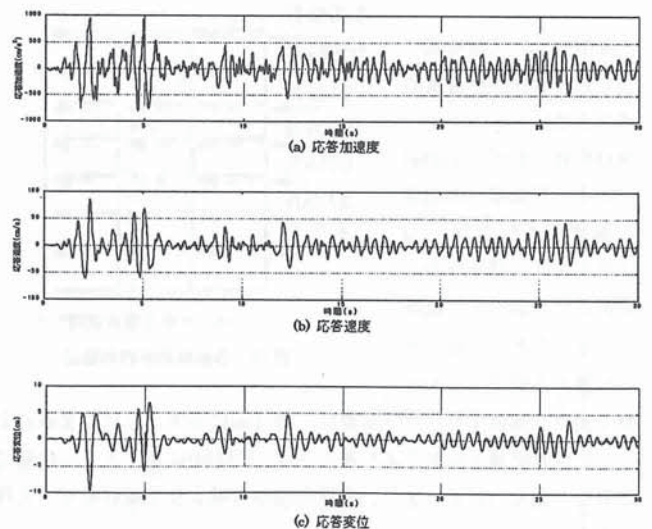


図19 時刻歴応答

謝辞

本研究の実施に際し、(株)飯島建築事務所の協力を得たのでここに謝意を表します。なお、本研究の一部は、平成 20 年度・科学研究費補助金（基盤 C, No.20510164）及び、平成 24 年度・文科省・戦略的基盤研究形成支援事業・「21 世紀型自然災害のリスク軽減に関するプロジェクト」の補助によることを付記します。

参考文献

- 1) 武藤厚、村田賢、ほか：3次元非線形解析システム SPACE への RC 弾塑性解析機能の組み込みと応用（その 1~3）、日本建築学会大会学術講演梗概集、2007~2008
- 2) "SPACE" マニュアル RC 編、名城大学、2008~2012
http://www.ra.meijo-u.ac.jp/labs/ra007/space/index.htm
- 3) 今西達也、中川佳久、窪田敏行：RC 建造物の耐震性能評価に用いる各種静的漸増解析プログラムの解析結果のばらつき比較、日本建築学会構造系論文集、第 545 号、127-134、2001 年
- 4) 日本建築学会近畿支部鉄筋コンクリート構造部会：鉄筋コンクリート建造物の耐震性能に関する最近の話題、2005
- 5) 日本建築学会編：建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)、日本建築学会、1990
- 6) 日本建築学会編：多次元入力地震動と建造物の応答、日本建築学会、1998
- 7) (財)日本建築防災協会：構造設計・部材断面事例集、2007

付録 1 本解析システムの総合的性能について

ここでは、本論で提案する RC 立体骨組の静的弾塑性解析システムの総合的な性能を検討するための事例を示す。具体的には、文献⁷⁾に示された典型的な構造設計事例を対象として、標準的な保有水平耐力評価に際して用いられる一般的なプログラムによる数値解析を別途実施し、比較を行った。対象建造物の平面は図付 1 に示し、耐震壁とフレームの方向別特性の明確な 5 層の整形な建物である（モデル詳細は文献 7 を参照されたい）。

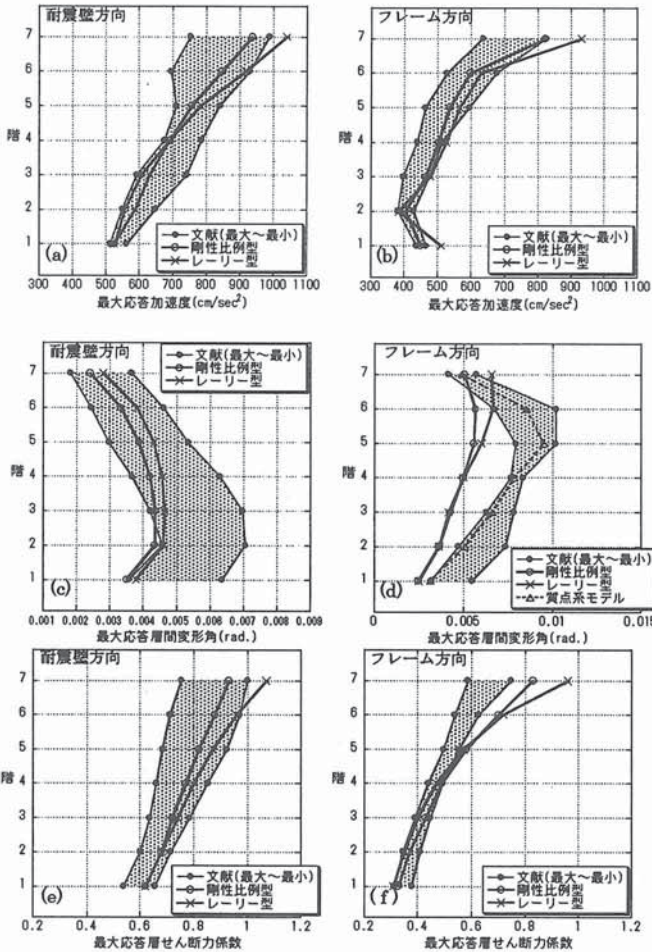


図 20 応答結果の比較

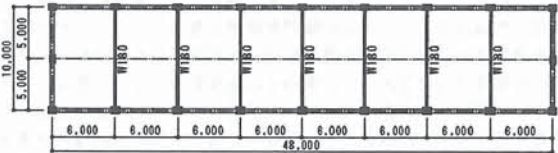
7. まとめ

本報告では教育用に開発・公開されている骨組の 3次元解析システムに対して、鉄筋コンクリート構造の弾塑性機能を組み込み、そのモデル化の概要や周辺機能を示し、解析事例として静的および動的な弾塑性解析を示した。以下に数値解析事例により得られた結果をまとめる。

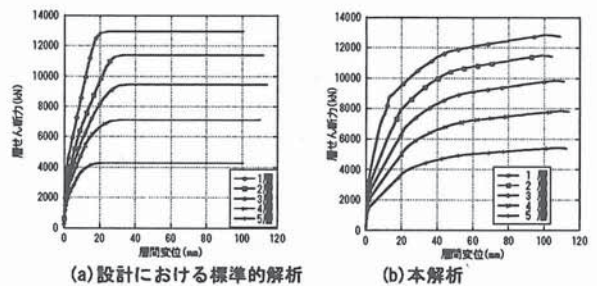
1) 静的解析結果からは、梁モデルに材端剛塑性ばねを用いた場合には文献と近い結果が得られた。一方、材端ファイバーを用いた場合には、圧縮軸力によって曲げ耐力が増加する。そのため文献に示された結果とは異なるものの、一般的な RC 建造物の破壊進展状況として妥当性のある結果を示している。

2) 骨組系地震応答解析では、耐震壁方向は文献と同等の結果が得られたが、フレーム方向については文献や質点系解析の結果より、剛性が高いという結果を得た。

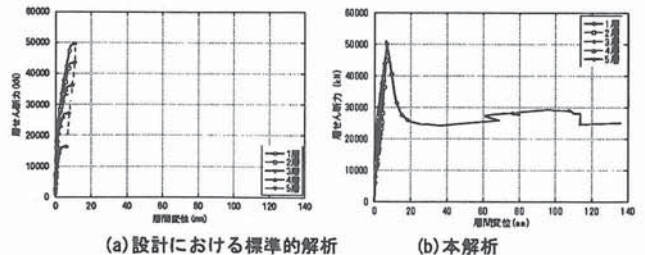
比較対象が一事例の数値解析ではあるが、以上の解析結果により、当該システムによる RC 立体骨組建造物の静的弾塑性解析及び弾塑性地震応答解析は一定の性能を有し、今後のモデル化の違いについての検証を可能とするシステムを提案できたと考えられる。しかし骨組系地震応答解析では、水平剛性が高く評価されるなど未だ検証の余地があり、そのほかの利用上の機能アップ等を含め、継続して開発する予定である。



図付 1 解析対象建物の平面



図付 2 荷重-変位関係（フレーム方向）



図付 3 荷重-変位関係（耐震壁方向）

図付2にはフレーム方向の静的弾塑性解析結果(Ai分布水平力)の比較を示す。同図(a)に示す標準的な保有水平耐力評価用のプログラムによる解析では、一般的に計算の安定性確保と高速化の為に柱・梁共に材端バネモデルが用いられることが多い。一方、本提案システムのように柱をファイバーモデルとした場合には、同図(b)に示すように、連続的な剛性の低下を表現している(耐力面での差異は小さい)。しかし、膨大な計算処理が必要となり、実用性の面では、本システムのように並列化や入出力での工夫が必要となる。

図付3には耐震壁方向の静的弾塑性解析結果の比較を示す。同図(a)に示す構造設計用の一般的な解析では、一般的に耐震壁の耐力以降の挙動を追跡する必要が無く、フレームへの再配分を安定して解析出来ないことも多い。一方、計算の安定性を表現している本システムでは、耐震壁の耐力以降の挙動を評価する為の基本性能を確保している(実挙動との比較・検証は今後の課題と考える)。

付録2 解析結果に与える影響について

RC立体骨組の弾塑性解析におけるモデル化に際して、結果に大きな影響を与える項目としては、平面骨組の解析における項目に加えて、一般に特に次の3項目が挙げられるよう。

1. 部材のモデル化
 - 1.1 柱(曲げ;MSモデル、ファイバーモデル、せん断;せん断ばね)
 - 1.2 はり(材端曲げばねモデル、材端ファイバーモデル)
 - 1.3 耐震壁(材端曲げばねモデル、材端ファイバーモデル)、雑壁
2. 床のモデル化(剛床、ブレース置換、せん断ばね置換)や剛域
3. 荷重位置の設定や剛域の取扱い

本報告ではこれらの点についての分析に至っていないが、今後、詳細に比較検討を実施の予定である。以下にはりのモデル化の影響についてのみ課題を示す。

1. 部材のモデル化;

はりモデルとして両端ファイバーを使用すると荷重位置によって、はりに大きな軸力が生じ、曲げ耐力が増加する場合がある。最終的にはりの曲げ耐力が増加すると骨組の水平耐力も増加する結果を示すこととなる(この点については、用いる曲げばねモデルが軸力との相互作用を考慮しているかどうかにも依存するが床剛性との兼ね合いもあり複雑である)。

また、はりをファイバーモデルとする場合には、荷重設定位置や、剛床を仮定した場合のはりの図心の伸びを拘束することになり、その結果圧縮軸力を発生させ、曲げ耐力の増加を招く可能性がある。弱軸の曲げモーメントにも注意が必要であろう。床のせん断変形時では、荷重方向に直交するはりには弱軸回りの曲げモーメントが発生し、これによってはりが塑性化することも考えられるが、これらは全て実現象との比較検討が重要であり、今後の課題と考えられる。